

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Anto Tolić

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
Doc. dr. sc. Branko Bauer

Student:
Anto Tolić

Zagreb, 2012.

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj završni rad izradio samostalno, služeći se znanjem stečenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, te također uz pomoć stručne literature korištene prilikom izrade rada, koja je navedena u popisu literature.

Također ovime koristim priliku da izrazim zahvalnost mentoru prof. dr. sc. Branku Baueru na stručnoj i profesionalnoj pomoći prilikom izrade završnog rada, te se također zahvaljujem i svim djelatnicima Katedre i Laboratorija za ljevarstvo, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Anto Tolić

U Zagrebu, rujan 2012.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA	IV
SAŽETAK.....	V
1. Uvod.....	1
2. Ljevarstvo.....	3
2.1. Lijevanje.....	3
2.1.1. Prednosti i nedostatci lijevanja	3
2.2. Metalne legure za lijevanje	4
2.3. Primjena odljevaka	5
3. Kalup.....	6
3.1. Općenito o kalupima	6
3.1.1. Jednokratni kalupi	7
3.1.2. Stalni kalupi	8
3.2. Uljevni sustav	9
3.2.1. Osnovne komponente uljevnog sustava.....	10
3.2.2. Vrste uljevnih sustava	11
3.3. Lijevanje u pješčane kalupe	11
3.3.1. Proizvodni proces u ljevaonici	12
4. Kontrola kvalitete odljevaka	14
4.1. Greške na odljevcima.....	14
4.2. Podjela grešaka na odljevcima prema izgledu.....	14
5. Peći za taljenje metala	16
5.1. Kupolna peć	17
5.1.1. Kupolna peć s hladnim zrakom	18
5.1.2. Kupolna peć s predgrijanim zrakom	18
5.1.3. Kupolna peć hlađena vodom.....	19
5.1.4. Obzidavanje kupolne peći	19
5.2. Plamene peći	19
5.3. Peći s loncem.....	20
5.4. Elektropeći	21
5.5. Indukcijske peći.....	22

6. Aluminij	23
6.1. Općenito o aluminiju.....	23
6.2. Svojstva aluminija	24
6.3. Primjena aluminija.....	25
6.4. Aluminijeve legura.....	25
6.4.1. Al – Si legura	26
6.4.2. Al – Mg legura.....	26
6.4.3. Al – Si – Mg legura.....	27
6.4.4. Al – Cu legura	27
6.4.5. Al – Si – Cu legura	27
6.5. Precipitacijsko očvrscenje	27
6.6. Skrućivanje aluminijevih legura	28
6.6.1. Tipovi skrućivanja	28
6.6.1.1. Čelijasto i čelijasto – dendritno skrućivanje	28
6.6.1.2. Dendritno skrućivanje	29
6.6.1.3. Eutektičko skrućivanje	29
6.7. Recikliranje aluminijevih legura	29
7. Priprema i obrada taljevine aluminijevih legura.....	30
7.1. Općenito o taljenju aluminijevih legura	30
7.2. Priprema metalnog uložka.....	31
7.3. Peći za taljenje aluminijevih legura.....	31
7.4. Usitnjavanje zrna aluminijevih legura	32
7.4.1. Sredstva za usitnjavanje zrna	33
7.4.1.1. AlTi predlegure	33
7.5. Al – Si eutektička modifikacija	34
7.5.1. Mehanizmi modifikacije	34
7.5.1.1. Kemijski modifikatori	34
7.5.1.2. Modifikacija brzim hlađenjem	34
7.6. Poroznost.....	35
7.6.1. Topivost plinova	35
7.6.2. Predtaljenje.....	35
7.6.3. Pročišćavanje plinovima.....	36
7.6.4. Otplinjavanje ultrazvučnim vibracijama	36

7.6.5. Otplinjavanje heksakloretnom	36
8. Eksperimentalni dio	37
8.1. Izrada odljevaka	37
8.1.1. Model odljevaka	38
8.1.2. Izrada kalupa	39
8.1.3. Lijevanje odljevaka	41
8.1.3.1. Lijevanje prvog odljevka	41
8.1.3.2. Lijevanje drugog odljevka	43
8.1.3.3. Lijevanje trećeg odljevka	44
8.1.3.4. Lijevanje četvrtog odljevka	45
8.1.3.5. Lijevanje petog odljevka	45
8.1.3.6. Lijevanje šestog odljevka	46
8.1.4. Vađenje odljevaka	47
8.2. Metalografska ispitivanja	48
8.2.1. Priprema uzoraka	48
8.2.1.1. Brušenje uzoraka	49
8.2.1.2. Poliranje	50
8.2.1.3. Nagrizanje	51
8.2.2. Ispitivanje mikroskopom	52
8.3. Mehanička ispitivanja na kidalici	52
8.3.1. Izrada epruveta	54
9. Rezultati i rasprava	55
9.1. Rezultati kemijske analize	55
9.2. Rezultati metalografskih ispitivanja	56
9.3. Rezultati radiografskog ispitivanja	63
9.4. Rezultati mehaničkih ispitivanja	67
10. Zaključak	70
Literatura	71

POPIS SLIKA

Slika 1. Ulijevanje taljevine u kalup.....	2
Slika 2. Blok automobilskog motora.....	5
Slika 3. Dijelovi kalupa	6
Slika 4. Ulijevanje taljevine u jednokratni pješčani kalup	8
Slika 5. Ulijevanje taljevine u stalni kalup	9
Slika 6. Osnovne komponente uljevnog sutava	11
Slika 7. Pješčani kalup	12
Slika 8. Proizvodni proces u ljevaonici.....	13
Slika 9. Kupolna peć.....	18
Slika 10. Plamena peć za taljenje aluminija.....	20
Slika 11. Peć s loncem	21
Slika 12. Elektrolučna peć	21
Slika 13. Indukcijska peć	22
Slika 14. Blok aluminija	23
Slika 15. Primjena aluminija - primjer limenke	25
Slika 16. Elektrootporna peć za taljenje aluminija.....	32
Slika 17. Shematski prikaz različitih veličina zrna	33
Slika 18. Blokovi aluminijske legure AlSi12	38
Slika 19. Model odljevka.....	39
Slika 20. Sabijanje kalupne mješavine	39
Slika 21. Postavljanje modela spusta i pojila	40
Slika 22. Umetanje kalupne mješavine	40
Slika 23. Oblikovanje spusta	40
Slika 24. Jednokratni pješčani kalup.....	41
Slika 25. Elektrootporna peć.....	41
Slika 26. Komadi AlSi12 legure u ljevačkom loncu	42
Slika 27. Taljenje AlSi12 legure.....	42
Slika 28. Mjerenje temperature taljevine.....	42
Slika 29. Ulijevanje taljevine u pješčani kalup.....	43
Slika 30. Odljevak neobrađene AlSi12 legure.....	43
Slika 31. Predlegura AlTi10 za usitnjavanje zrna	44
Slika 32. Tableta Nitrala C19.....	44

Slika 33. Potapanje tablete u taljevini	45
Slika 34. Pakiranje Modikalita.....	46
Slika 35. Miješanje Modikalita s taljevinom.....	46
Slika 36. Pakiranje natrija	47
Slika 37. Dodavanje natrija u taljevinu.....	47
Slika 38. Razbijanje kalupa	48
Slika 39. Izdvajanje uzoraka i komada odljevka.....	49
Slika 40. Izdvojeni uzorak za metalografsko ispitivanje	49
Slika 41. Stroj za brušenje ispitnih uzoraka	50
Slika 42. Ultrazvučna čistilica	50
Slika 43. Uređaj za poliranje.....	51
Slika 44. Dijamantne paste.....	51
Slika 45. Svjetlosni mikroskop	52
Slika 46. Hidraulička kidalica	53
Slika 47. Epruveta u čeljustima kidalice.....	53
Slika 48. Dimenzije epruvete	54
Slika 49. Ispitna epruveta za mehanička ispitivanja.....	54
Slika 50. Mikrostruktura neobrađene AlSi12 legure (povećanje 200x).....	56
Slika 51. Mikrostruktura neobrađene AlSi12 legure (povećanje 500x).....	57
Slika 52. AlSi12 legura cijepljena AlTi10 predlegurom (povećanje 200x).....	57
Slika 53. AlSi12 legura cijepljena AlTi10 predlegurom (povećanje 500x)	58
Slika 54. Mikrostruktura neobrađene AlSi12 legure otplinjene Nitralom C19 (povećanje 200x).....	59
Slika 55. Mikrostruktura neobrađene AlSi12 legure otplinjene Nitralom C19 (povećanje 500x)	59
Slika 56. Mikrostruktura AlSi12 legure cijepljene AlTi10 predlegurom i otplinjena Nitralom C19 (povećanje 200X)	60
Slika 57. Mikrostruktura AlSi12 legure cijepljene AlTi10 predlegurom i otplinjena Nitralom C19 (povećanje 500X)	60
Slika 58. Mikrostruktura AlSi12 legure s modificirane Modikalitom (povećanje 200x).....	61
Slika 59. Mikrostruktura AlSi12 legure s modificirane Modikalitom (povećanje 500x).....	61
Slika 60. Mikrostruktura AlSi12 legure modificirane čistim natrijem (povećanje 200x)	62
Slika 61. Mikrostruktura AlSi12 legure modificirane čistim natrijem (povećanje 500x)	62

Slika 62. Radiogram epruveta neobrađene AlSi12 legure	63
Slika 63. Radiogram epruveta AlSi12 legure cijepljene AlTi10 predlegurom.....	64
Slika 64. Radiogram epruveta neobrađene AlSi12 legure otplinjene Nitralom C19...	64
Slika 65. Radiogram epruveta AlSi12 legure cijepljene AlTi10 predlegurom i otplinjene Nitralom C19	65
Slika 66. Radiogram epruveta AlSi12 legure modificirane Modikalitom	65
Slika 67. Radiogram epruveta AlSi12 legure modificirane čistim natrijem.....	66
Slika 68. Srednje vrijednosti vlačnih čvrstoća uzoraka epruveta	68
Slika 69. Srednje vrijednosti istezljivosti uzoraka epruveta	68
Slika 72. Računalni zapis rezultata ispitivanja na kidalici za uzorak 5 i 6.....	69
Slika 71. Računalni zapis rezultata ispitivanja na kidalici za uzorak 3 i 4.....	69
Slika 70. Računalni zapis rezultata ispitivanja na kidalici za uzorak 1 i 2.....	69

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prednosti i nedostaci lijevanja	4
Tablica 2. Fizikalna i mehanička svojstva aluminija	24
Tablica 3. Prikaz odljevaka korištenih za ispitivanja	38
Tablica 4. Rezultati kemijske analize AlSi12 legure	55

SAŽETAK

Ovaj rad sastoji se od dva dijela: teoretskog i eksperimentalnog.

U teorijskom dijelu dan je pregled lijevanja, definicija i pojmova važnih za izradu ovog rada. Objašnjen je postupak lijevanja u pijesak, kalupi, kontrola kvalitete odljevaka te peći za taljenje metala. Također je navedena podjela i primjena aluminijevih legura te su detaljno objašnjene metode pripreme i obrade aluminijevih legura.

U eksperimentalnom dijelu ispitivan je utjecaj pripreme i obrade AlSi12 legure na mikrostrukturu i mehanička svojstva. U tu svrhu provedeno je lijevanje osnovne neobrađene AlSi12 legure, AlSi12 legure s dodatkom AlTi10 predlegure, neobrađene AlSi12 legure otplinjene Nitralom C19, AlSi12 legure s dodatkom AlTi10 predlegure otplinjene Nitralom C19 te AlSi12 legure modificirane s dodatkom natrija u čistom i u obliku soli. Napravljeni su i pripremljeni uzorci te je određen kemijski sastav zadane AlSi12 legure. Provedena su radiografska, metalografska i mehanička ispitivanja uzoraka i epruveta.

Na temelju dobivenih rezultata ispitivanja može se zaključiti da metoda modifikacije AlSi12 legure čistim natrijem poboljšava mehanička svojstva legure. Vrijednosti vlačne čvrstoće i istezljivosti znatno su više nego kod ostalih metoda pripreme i obrade aluminijeve legure. Najbolji rezultati ispitivanja poroznosti uočeni su na epruvetama AlSi12 legure s dodatkom AlTi10 predlegure i otplinjene Nitralom C19.

1. UVOD

Proizvodnja metalnih predmeta lijevanjem, odnosno proizvodnja metalnih odljevaka je vrlo star postupak. Najstariji pronađeni lijevani metalni predmeti datiraju iz perioda oko 4500 godina prije nove ere. Proizvodnja odljevaka dugo vremena se zasnivala na empirijskim pravilima, odnosno metodama pokusa i pogreška, zbog nedovoljnih spoznaja o procesima koji se događaju tijekom taljenja te lijevana i skrućivanja odljevaka u kalupima. Premda se osnovni principi lijevanja metala nisu značajnije promijenili kroz povijest od svojih početaka, znanstvene spoznaje o procesima u ljevarstvu koje se permanentno nadograđuju rezultirale su širokim spektrom pouzdanih postupaka i materijala koji se danas uspješno oblikuju lijevanjem. Lijevanje je danas u velikoj mjeri istraženo i poznato, vrlo konkurentan i efikasan proizvodni proces za izradu metalnih predmeta različitih oblika, veličina i kompleksnosti čija kvaliteta udovoljava zahtjevima suvremenog tržišta. [1]

Lijevanje je jedna od tehnologija oblikovanja metalnih predmeta kojom se taljevina (rastaljeni metal) oblikuje ulijevanjem u kalupe. Taljevina poprima oblik i dimenzije kalupne šupljine, te zadržava oblik nakon skrućivanja. Tehnologija lijevanja je jedan od najstarijih i najdjelotvornijih načina oblikovanja proizvoda. Usprkos različitim konkurentnim i novim tehnologijama proizvodnje, velika potražnja za odljercima, zbog jednostavnosti proizvodnje nastaviti će se i dalje. Visoka produktivnost i laka mogućnost izrade replika čine je iznimno pogodnom za serijsku i masovnu proizvodnju odljevaka. Zbog izuzetno velike proizvodnosti pogodna je i automatizaciju, a kako se radi o proizvodnji karakteriziranoj transportom teških predmeta, nužan preduvjet je mehanizacija iste. Ona je često puta i jedina tehnologija za izradu vrlo složenih dijelova s unutrašnjim šupljinama (npr. blokovi motora i sl.) ili za velika i masovna kućišta strojeva. Tehnologijom lijevanja moguće je dijelove strojeva, koji bi se inače morali lijevati parcijalno, odliti u jednom komadu odjednom. Oblikovanje se obavlja u tekućem stanju, a taljevina kao i sve poznate tekućine zahtijevaju minimalan utrošak energije za promjenu oblika, pogotovo što se kao uljevna sila najčešće koristi gravitacija. Ukupni trošak energije je ipak znatan, jer materijal prethodno treba rastaliti i dovesti u tekuće stanje. Iskorištenje energije je povoljnije što je oblik odljevka složeniji, budući da utrošena energija ovisi o utrošenoj

masi, a ne o složenosti oblika. Zbog toga je lijevanje nenadomjestiva tehnologija u izradi proizvoda složenog oblika. [2]

Lijevanje metala prati čovječanstvo od samih početaka. Poznato je da su pojedina doba u povijesti nazvana upravo prema vrsti materijala koji se u tom vremenu lijevao i koristio za izradu oružja i oruđa, a koje je čovjek koristio u svakodnevnom životu. Tako postoje kameno, bakreno, brončano i željezno doba. [3]

Glavni cilj ljevača je postizanje konzistentne visoke kvalitete i zahtijevanih svojstava odljevaka uz što je moguće niže proizvodne troškove. Međutim, lijevanje metala je vrlo kompleksan proces i često može rezultirati neočekivanim rezultatima jer obuhvaća vrlo velik broj varijabli koje se moraju strogo kontrolirati. Kvaliteta uloženih materijala, temperatura i brzina lijevanja, kvaliteta kalupa, uljevni sustav i sustav napajanja odljevka itd. samo su jedan dio iz velikog skupa varijabli koje utječu na konačnu kvalitetu i svojstva odljevaka [1]. Na slici 1 prikazano je ulijevanje taljevine u pješčani kalup.



Slika 1. Ulijevanje taljevine u kalup [5]

2. LJEVARSTVO

2.1. Lijevanje

Proizvodnja odljevaka u pravilu se sastoji od tri međusobno povezane operacije: taljenje, kalupljenje te ulijevanje taljevine u kalup. Nakon hlađenja odljevka u kalupu, slijedi njegovo istresanje iz kalupa, čišćenje, brušenje, potrebna završna obrada, skladištenje i na kraju otprema odljevka. Za vrijeme ulijevanja, skrućivanja i ohlađivanja, taljevina na kalup djeluje mehanički, kemijski i toplinski. Svako od navedenih djelovanja ima utjecaja na kvalitetu odljevka, pa ih tijekom proizvodnje odljevka treba svesti na najmanju moguću mjeru. Taljenje i poček taljevine danas se uglavnom obavlja u električnim pećima, a samo u iznimno velikim i zahtjevnim pogonima koristi se kemijska energija. Ljevarstvo još uvijek spada u rizične tehnologije, jer je proces kontinuiran te ga je teško u cijelosti kontrolirati. Zato će se ljevarstvo odvijati ne samo u iskorištavanju mogućnosti velike proizvodnje, nego i u smanjenju rizika u njoj. [2]

Izbor tehnologije lijevanja ovisi o nizu parametara kao što su masa odljevka, dimenzije odljevka, vrsta legure korištena za lijevanje, veličina serije odljevaka i dr. Treba odabrati tehnologiju lijevanja odljevaka koja će dati najmanju cijenu jednog odljevka, uvažavajući da se odabranom tehnologijom lijevanja mogu zadovoljiti svi traženi uvjeti kvalitete. Obzirom na potrebe za odljencima, danas se većina odljevaka lijeva u jednokratne meke pješčane kalupe [2]. Osim toga proces nastajanja odljevka nije vidljiv jer metal ispunjava zatvoreni kalup. [6]

2.1.1. Prednosti i nedostaci lijevanja

Lijevanje kao jedna od najdjelotvornijih tehnologija dobivanja gotovih proizvoda ima određene prednosti i nedostatke. Tablica 1 zorno prikazuje sve prednosti i nedostatke tehnologije lijevanja.

Tablica 1. Prednosti i nedostaci lijevanja [6]

PREDNOSTI	NEDOSTACI
<ul style="list-style-type: none"> • složena geometrija vanjskog i unutarnjeg dijela odljevka • moguće dobiti dimenzijski točan oblik • moguće proizvesti vrlo velike odljevke • moguće korištenje bilo kojeg materijala • moguća masovna proizvodnja • velik raspon dimenzija – od 1g do 250 t 	<ul style="list-style-type: none"> • ograničenja u mehaničkim svojstvima • dimenzijska točnost • kvaliteta površine • opasnost u proizvodnji • utjecaj na okoliš

2.2. Metalne legure za lijevanje

Danas se za proizvodnju odljevaka upotrebljavaju različite legure metala. Izbor legure metala za lijevanje određenog odljevka ovisi o nizu faktora, a to su mehanička svojstva, otpornost na koroziju, svojstva na povišenim ili niskim temperaturama, magnetska svojstva, težina, livljivost ili neka druga posebna svojstva.

Podjela metalnih legura za lijevanje:

- legure za lijevanje na bazi željeza:
 - sivi lijev
 - temper lijev
 - čelični lijev
 - nodularni lijev
 - bijeli tvrdi lijev.

- neželjezne legure:
 - bakar
 - aluminij
 - magnezij
 - olovo
 - cink
 - kositar
 - titan.

2.3. Primjena odljevaka

Najveća primjena odljevaka je u automobilskoj industriji sa približno 40 % željeznog lijeva, te 60 % aluminijskog lijeva. U jedan automobil ugrađeno je više od stotinjak odljevaka. Većina tehničkih sklopova nezamisliva je bez odljevka, tako da je primjena odljevaka jako raširena [6]. Na slici 2 prikazan je odljevak bloka motora automobila.

Najvažniji partneri lijevačkoj industriji su:

- automobilska industrija
- strojogradnja
- građevinska industrija i građevinski strojevi
- medicina
- brodogradnja
- tračnička vozila
- energetika
- zrakoplovna i svemirska industrija
- lijevanje umjetničkih skulptura



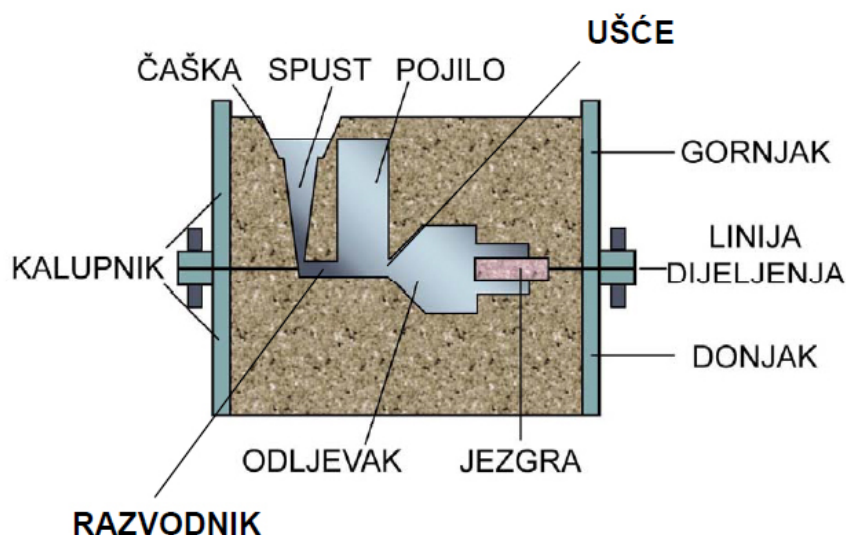
Slika 2. Blok automobilskog motora [8]

3. KALUP

3.1. Općenito o kalupima

Da bi se izradio odljevak, mora se taljevina koja kao tekućina poprima oblik zapremine u kojoj se nalazi, uliti u oblik koji odgovara izgledu odljevka. Nakon skrućivanja i hlađenja taljevine dobije se oblikovani proizvod. Ovako oblikovan proizvod naziva se odljevak, a zapremina u kojoj se oblikuje naziva se kalup. Dakle, kalup je u stvari alat kojim se oblikuje odljevak. Pomoću kalupa se oblikuju ne samo vanjski oblik odljevka, nego se pogodnim umecima koje se nazivaju jezgre, koje odmah pri ulijevanju formiraju unutarnje šupljine i kanale u odljevku. [2]

Kalup kao alat za proizvodnju gotovih proizvoda – odljevaka sastoji se od nekoliko dijelova. Kalup je podijeljen na dva dijela, a čine ga gornjak (engl. cope), te donjak (engl. drag), kalupnika, odnosno posude ili okvira kalupa najčešće izrađenog od metala. Razdjelna linija je linija dijeljenja između gornjaka i donjaka, uljevni sustav sačinjen od čaške, spusta, razvodnika i ušća, te pojilo kao izvor taljevine kako bi se nadoknadio materijal jer tijekom skrućivanja dolazi do smanjenja volumena [6]. Na slici 3 prikazan je kalup sa detaljnim dijelovima.



Slika 3. Dijelovi kalupa [6]

Razlikuju se dvije vrste kalupa, jednokratni i stalni kalupi, te dva oblika kalupa, zatvoreni i otvoreni. Temeljna razlika između otvorenih i zatvorenih kalupa je u tome što se otvoreni kalupi koriste za jednostavne odljevke, dok se zatvoreni kalupi koriste za proizvodnju složenijih oblika. [6]

Izbor jednokratnog ili stalnog kalup vrlo je složen, a ovisi o tehnološkim ili ekonomskim kriterijima, od kojih su najznačajnija vrsta legure koja se lijeva i veličina serije. Kod lijevanja u jednokratne kalupe za izradu svakog pojedinog odljevka mora se svaki put izraditi novi kalup, tj. kalup je jednokratno upotrebljiv, dok se kod lijevanja u stalne kalupe pomoću jednog kalupa oblikuje veliki broj odljevaka. Ovisno o veličini odljevka, jedan kalup može sadržavati jedan ili više odljevaka. Kalup mora biti izrađen od materijala temperaturno višestruko otpornijeg nego što je lijevana legura. [2]

Klasifikacija procesa lijevanja metala:

- lijevanje metala u jednokratne kalupe:
 - lijevanje u pijesak
 - školjkasti lijev
 - lijevanje u pune kalupe
 - tlačni (precizni) lijev
 - lijevanje u kalupe od gipsa
 - lijevanje u keramičke kalupe
 - vakuumsko kalupljenje pijeska.
- lijevanje metala u stalne kalupe:
 - kokilni lijev
 - tlačni lijev
 - centrifugalni lijev.

3.1.1. Jednokratni kalupi

Jednokratni kalupi za lijevanje metala danas su najrašireniji tip kalupa u tehnologiji ljevarstva. Kalup treba omogućiti dobivanje što točnijih dimenzija i što glađe površine [6]. Materijal od kojeg je izrađen jednokratni kalup ne odbacuje se nakon lijevanja, nego se od tog istog materijala, uz određene tehnološke zahvate ponovno izrađuje kalup. Budući da se kod korištenja jednokratnih kalupa mora prije ulijevanja za svaki odljevak izraditi kalup, a s obzirom na najčešće veliki broj kalupa, oni se izrađuju u ljevaonici, s posebno u tu svrhu izvedenom opremom tzv. kalupnim linijama. Materijal od kojeg se izrađuje jednokratni kalupi naziva se kalupna mješavina, dok se izrada kalupa naziva kalupljenje. Kalupna mješavina sastoji se od osnovnog materijala,

kremenog ili kvarcnog pijeska, veziva i različitih dodataka. Vezivo obično određuje vrstu jednokratnog kalupa. Ukoliko se koriste veziva koje vezuje fizikalnim silama tada se kalupi nazivaju mekima, a ukoliko se vezivanje odvija kemijskim reakcijama, ti se kalupi nazivaju tvrdima [2]. Na slici 4 prikazano je ulijevanje taljevine u jednokratni pješčani kalup

Osnovna obilježja jednokratnih kalupa:

- kalupe je potrebno nakon lijevanja metala uništiti kako bi se mogao izvaditi gotovi odljevak
- kalupni materijal čine pijesak (kvarcni ili kremeni), vezivo i dodaci
- koristi se za izradu složenijih oblika odljevaka.



Slika 4. Ulijevanje taljevine u jednokratni pješčani kalup [6]

3.1.2. Stalni kalupi

Stalni kalupi izrađeni su od metala ili grafita i mogu se upotrebljavati više puta. U takvim kalupima izrađuje se veliki broj odljevaka. Stalni kalupi imaju dobru toplinsku provodljivost, pa skrućivanje metala traje kratko. Struktura odljevaka je iz tog razloga finožrnata. Lijevanje metala u stalne kalupe zahtjeva manju radnu površinu nego li lijevanje u pijesak jer opada manipulacija velikog broja kalupnika i pijeska.

Proces lijevanja u stalne kalupe moguće je mehanizirati i automatizirati. Zbog velike cijene izrade upotrebljavaju se kod većih serija odljevaka. [2]

Za vrijeme rada kalupi su izloženi visokim toplinskim opterećenjima. Oni se za vrijeme ulijevanja taljevine naglo zagrijevaju, a nakon vađenja odljevka naglo se hlade. Da bi kalupi mogli podnositi takva toplinska opterećenja, oni moraju biti izrađeni od materijala koji imaju potrebnu toplinsku vodljivost te otpornost na habanje. Stalni kalupi izrađuju se od sivog lijeva ili legiranog čelika, dok se u novije vrijeme za izradu stalnih kalupa koriste i neke legure aluminija i bakra, te grafit za kokilni lijev. Odabir materijala za izradu stalnog kalupa ovisi o vrsti legure koja se lijeva u kalup [6]. Na slici 7 prikazan je primjer ulijevanja taljevine u stalni kalup.



Slika 5. Ulivanje taljevine u stalni kalup [7]

3.2. Uljevni sustav

Uljevnim sustavom smatramo skup kanala različitoga oblika kojima dovodimo taljevinu u kalupnu šupljinu, s ciljem da postignemo popunjavanje kalupa u što kraćem vremenskom roku, sa što manjim pregrijavanjem, mirnijim strujanjem taljevine i uz što manji utrošak materijala.

Kako se taljevina hladi za vrijeme ispunjavanja kalupa, uljevni sustav mora osigurati povoljan raspored topline radi kompenzacije usahlina i napetosti, pravilnu brzinu punjenja da ne dođe do usisavanja zraka, erozije kalupa i jezgre, stvaranja troske i uključina, što su sve važni čimbenici za kvalitetu odljevaka, te također je važan i zahtjev za ekonomičnošću uljevnog sustava radi utjecaja na cijenu. [2]

Pravilo konstruiran uljevni sustav mora zadovoljiti niz kriterija:

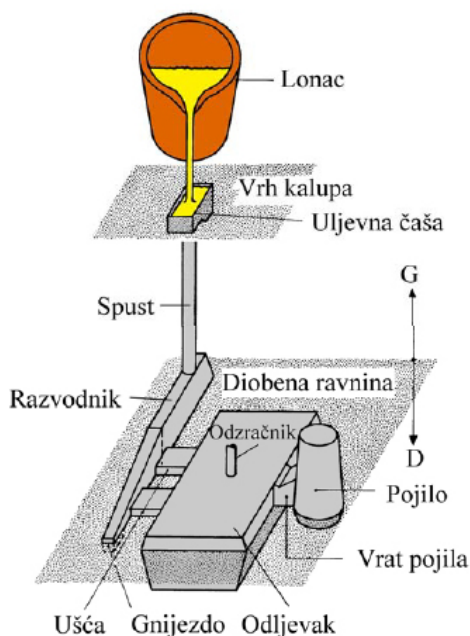
- brzo popunjavanje kalupne šupljine
- minimalizacija turbulencije
- izbjegavanje erozije kalupa i jezgre
- uklanjanje troske, metalnih oksida i uključina
- spriječiti zahvaćanje zraka i ukloniti plinove iz kalupne šupljine
- izbjegavanje distorzije odljevka
- stvaranje pogodnih toplinskih gradijenata
- omogućiti proizvodnju odljevaka uz korištenje minimalne količine metala
- ekonomičnost uklanjanja uljevnog sustava
- kompatibilnost s postojećim načinom kalupovanja i lijevanja. [1]

3.2.1. Osnovne komponente uljevnog sustava

Osnovne komponente uljevnog sustava (prikazani na slici 6) su:

- uljevna čaša
- spust
- podnožje spusta
- razvodnik
- ušče
- odzračnik (odzračnici).

Sve navedene komponente uljevnog sustava međusobno su povezane primjenom specifičnih pravila i proračunatih omjera. Uljevni sustav može sadržavati i elemente koji osiguravaju napajanje odljevka (pojila) [1]. Na slici 6 prikazane su osnovne komponente uljevnog sustava.



Slika 6. Osnovne komponente uljevnog sutava [1]

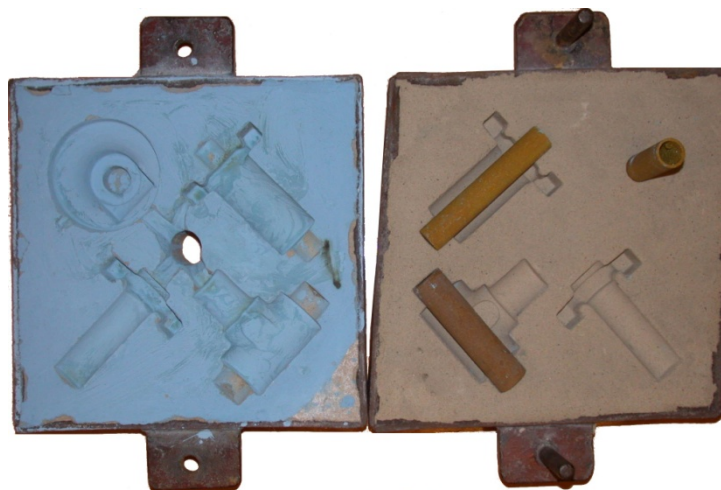
3.2.2. Vrste uljevnih sustava

Obzirom na tehniku izrade kalupa, odnosno diobenu ravninu kalupa, uljevni sustavi mogu se podijeliti u dvije temeljne grupe: horizontalni i vertikalni uljevni sustavi. Horizontalni uljevni sustavi češći se koriste u praksi, dok vertikalni uljevni sustavi primjenjuju se kod automatskih linija za izradu kalupa s vertikalnom diobenom linijom npr. Disamatic linije. [1]

3.3. Lijevanje u pješčane kalupe

Lijevanje metala u pješčane kalupe je postupak lijevanja metala u jednokratni kalup za čiju se izradu upotrebljava kalupna mješavina. Prednosti lijevanja u pješčane kalupe su: lijevanje velikog broja različitih legura, lijevanje složenih oblika odljevaka i lijevanje odljevaka svih veličina, od nekoliko grama do nekoliko tona. Također je tijekom skrućivanja odljevka smanjenja mogućnost nastajanja pukotina jer pješčani kalupi omogućavaju nesmetano skupljanje metala. Pješčani kalupi mogu biti nesusušeni ili svježi i suhi. Uobičajeni se nesusušeni kalupi izrađuju od pijeska s dodatkom vezivne gline i vode. U pješčanim kalupima mogu se lijevati odljevci debljine stjenke do približno 4 mm, iako nije uobičajeno da se uspješno odliju i stjenke debljine svega 2 mm. Za proizvodnju malog broja odljevaka, lijevanje u

pješčane kalupe zahtjeva najmanja ulaganja u potreban alat i opremu za izvođenje lijevanja [2]. Na slici 7 prikazan je pješčani kalup.



Slika 7. Pješčani kalup [9]

3.3.1. *Proizvodni proces u ljevaonici*

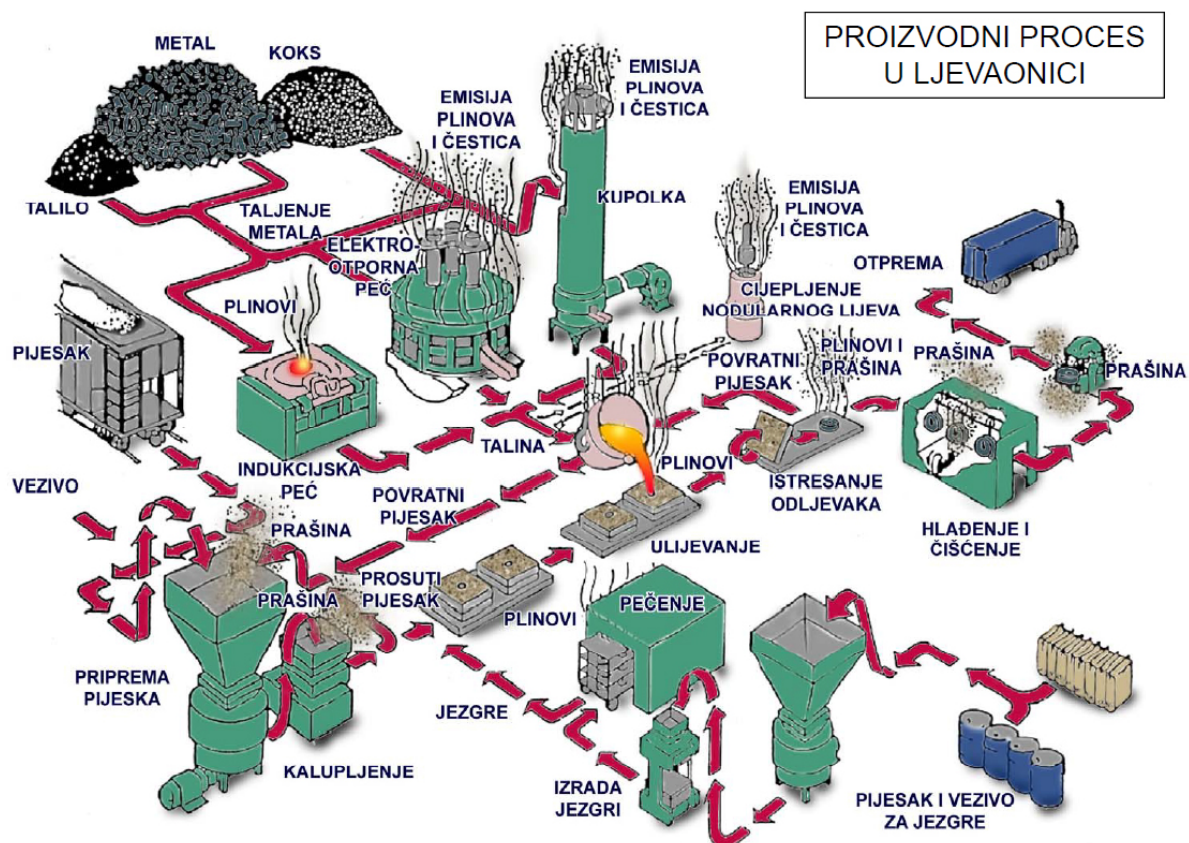
Ljevaonica je mali, srednji ili veliki, ovisno o broju radnika i osnovi godišnjeg poslovanja, pogon opremljen za proizvodnju kalupa, taljenja i obradu taljevine, provođenja postupka lijevanja, čišćenja i daljnju obradu odljevka, te antikorozivnu zaštitu. Djelatnici ljevaonica nazivaju se ljevači. [6]

U Hrvatskoj je u 2008. godini bilo aktivno 40 ljevaonica koje su zapošljavale 4425 zaposlenika i ostvarivale proizvodnju od 72 515 tona odljevaka. [10]

Proizvodni proces u ljevaonici:

- rastaljeni metal ulijeva se u pješčani kalup
- skrućivanje metala unutar kalupa
- kalup se istresa kako bi se izradio odljevak
- odljevak se čisti i pregledava
- primjenjuje se naknadna toplinska obrada kako bi se poboljšala svojstva odljevka ukoliko je potrebno
- skladištenje i transport odljevka. [6]

Na slici 8 prikazan je proizvodni proces u lijevaonici lijevanja taljevine u pješčane kalupe.



Slika 8. Proizvodni proces u ljevaonici [6]

4. KONTROLA KVALITETE ODLJEVAKA

Nakon završetka svih faza izrade, slijedi faza kontroliranja karakteristika odljevaka koje utječu na njegovu upotrebljivost. Ovisno o namjeni korištenja odljevka, različitu su i zahtjevi kvalitete. Kod odljevaka gdje se zahtjeva samo točnost osnovnog oblika, provodi se vizualna kontrola kvalitete. Ukoliko postoje zahtjevi za dimenzijsku točnost, provodi se kontrola kvalitete mjerenjem, dok je za sva ostala svojstva kao što su kemijski sastav, mehanička svojstva, struktura, nepropusnost i dr. potrebno provesti laboratorijska ispitivanja. [6]

4.1. Greške na odljercima

U tehnološkom procesu proizvodnje odljevaka, postupcima koji se provede i materijalima koji se koriste nalazi se mnogo potencijalnih mjesta nastanka greške. Veze između uzroka i posljedica te mogućnost međudjelovanja različitih uzroka nastanka škarta vrlo su složene. Jedan uzrok može izazvati više različitih pogrešaka, a ista greška može biti uzrokovana djelovanjem različitih uzroka ili njihovom kombinacijom. Zadatak ispitivanja grešaka sastoji se u što jasnijem definiranju vrste greške, uzroka njezinog nastajanja i sukladno tome razvijanje potrebnih protumjera. Današnjim razvijenim metodama simulacija ulijevanja i skrućivanja moguće je ostvariti znatne uštede, jer se potencijalna greška uočava već na virtualnom modelu u fazi tehnološke razrade, te ju je moguće izbjeći pravilnim preoblikovanjem uljevnog sustava. Postoji više klasifikacija vrsta pogrešaka. Tako greške možemo podijeliti prema postupku lijevanja ili izgledu pogreške.

Greške na odljercima prema postupcima lijevanja dijele se na greške do kojih može doći kod bilo kojeg postupka lijevanja, te na greške karakteristične za lijevanje u pijesak.

4.2. Podjela grešaka na odljercima prema izgledu

Prema izgledu greške se mogu klasificirati u sedam osnovnih razreda, oznakama velikih slova od A do G. Svaki razred je podijeljen u skupine, dok su skupine grešaka podijeljene u podskupine, a unutar podskupina navedene su pojedinačne greške. [6]

Razredi grešaka:

- A – izrasline
 - A – 100 srhaste
 - A – 110 bez promjena dimenzija
 - A – 111 srh
 - A – 112 žilice
 - A – 113 mrežica
 - A – 114 listovi
 - A – 115 pera
 - A – 120 s promjenama dimenzija
 - A – 200 masivne
- B – šupljine
- C – napukline
- D – površinske greške
- E – nepotpunosti
- F – netočnosti mjera i oblika
- G – uključine i heterogenosti [2]

5. PEĆI ZA TALJENJE METALA

Kod opremanja ljevaonica posebnu pažnju treba posvetiti pećima za taljenje metala jer o njima u najvećoj mjeri ovisi kvaliteta samog odljevka. Peći za taljenje služe za proizvodnju taljevine određenog kemijskog sastava i temperature. Također je vrlo bitan i kapacitet peći, a to je u biti masa taljevine kojom se odjednom može raspolagati. Kapacitet peći uvijek treba biti veći od mase najvećeg odljevka koji će se lijevati. Iskorištenje peći je bolje što je kapacitet peći veći. Proizvodnost tj. količina taljevine proizvedene u određenom vremenu, ovisi o kapacitetu peći, načinu zagrijavanja, vrsti zasipa i temperaturi taljevine. [3]

Razlikuju se dva osnovna načina taljenja metala:

- kada je izvor topline u zasipu, npr. indukcijska električna peć
- kada je izvor topline izvana, npr. otporna električna peć.

Peći s izvorom energije u zasipu imaju manje toplinske gubite, a time i veću proizvodnost. Za taljenje metala koristi se kemijska energija goriva koksa, loživog ulja, plina ili električna energija. Upotreba električne energije omogućava dobru kontrolu temperature taljenja, atmosferu u peći i izolaciju te se zbog toga primjenjuje u proizvodnji legura osjetljivih na onečišćenja tokom taljenja.

U odnosu na način rada razlikujemo dva osnovna tipa peći:

- peći koje rade kontinuirano (kupolna peć)
- peći koje rade diskontinuirano (tiganjska peć).

Peći se odabiru na temelju ekonomskih i tehničkih uvjeta ljevaonice. Pri izboru peći za taljenje metala prvenstveno se mora voditi računa o materijalu koji se lijeva u ljevaonici.

Peći za taljenje aluminija moraju imati visoki učinak taljenja metala uz visoko iskorištenje topline te dobru i ravnomjernu regulaciju temperature. U ljevaonicama se ove peći primjenjuju za taljenje, rafiniranje i lijevanje. Svaka od ovih primjena stavlja pred konstruktore peći odgovarajuće specifične zahtjeve. Posljednjih se godina pojavio čitavi niz novih konstrukcija peći, a sve one imaju dobrih i loših strana te se

upotrebljavaju za određene svrhe. Peći koje bi se mogle jednako dobro koristiti za sve ljevačke operacije do danas još uvijek nema. [3]

Za zagrijavanje ljevaoničkih peći za taljenje metala koriste se:

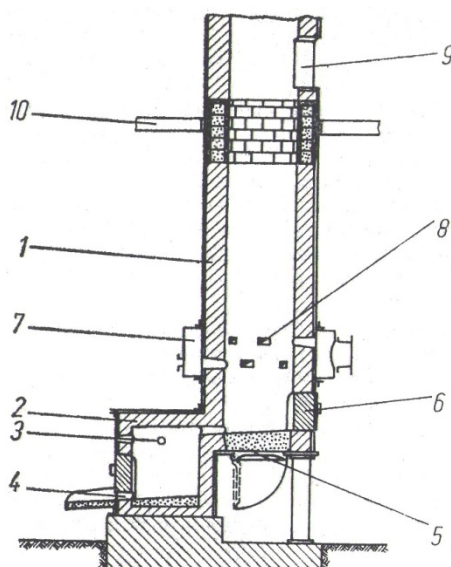
- kruta goriva
- tekuća goriva
- plinovita goriva
- električna energija.

Vrsta goriva bira se na temelju namjene i ekonomičnosti peći. Peći za taljenje moraju imati visok učinak po satu, uz što manji odgor. Koeficijent toplinske iskoristivosti mora biti što veći, ali on je različit kod svake vrste goriva koje se koristi za zagrijavanje peći.

S obzirom na izvedbu peći mogu biti stabilne i nagibne. Razvojem tehnološkog procesa u ljevaonicama često trebaju biti dvije peći, talionička peć i lijevalica. U talioničkoj peći metal se tali, dok u lijevalici se vrši korektura sastava, temperature ulijevanja i iz nje se ulijeva litina u kalup. Iz lijevalice mora biti omogućeno mirno i jednolično lijevanje litine. [3]

5.1. Kupolna peć

Kupolna peć ili kupolka je najekonomičnija peć za taljenje metala, te služi za pretaljivanje svih vrsta željeznih ljevova [11]. Kupolne peći su vertikalne cilindrične peći opremljene žlijebom za izlijevanje taljevine na dnu. Karakterizira ih visoka učinkovitost i ekonomičnost za serijsku proizvodnju. Zasip koji se sastoji od željeza, koksa, talila i legirnih elemenata, ubacuju se u peć kroz vratašca koja su smještena na manje od pola visine peći i s gornje strane [6]. Slika 9 prikazuje kupolnu peć.



Slika 9. Kupolna peć [11]: 1 kupolna peć, 2 pretpećica, 3 otvor za ispust taline, 4 otvor za ispust taline, 5 otvor za pražnjenje peći, 6 otvor za potpalu, 7 komora za zrak, 8 sapnice, 9 otvor za zasip, 10 zasipna platforma

5.1.1. Kupolna peć s hladnim zrakom

Kupolna peć u osnovi se sastoji od cilindričnog čeličnog plašta, kojem debljina ovisi o veličini peći u rasponu od 6 do 12 mm. Iznutra je obložena vatrostalnim materijalom, kružnog je presjeka i unutarnji profil peći ovisi o njezinoj veličini. Na donjem kraju s unutarnje strane peći, željezni ili čelični prsten, a na gornjem se dijelu prsten produžava u dimnjak, odnosno iskrolovku. Pod peći se obično izrađuje zbijanjem kalupnog pijeska, a leži na vratima, koja omogućavaju pražnjenje peći nakon završetka taljenja. Vrata su ugrađena u čeličnu ploču koja zatvara plašt s donje strane. Rastaljeni metal se ispušta kroz otvor pri dnu peći, te peć ima pod s blagim nagibom prema strani za ispust rastaljenog metala. Za dovod hladnog zraka peći koriste se ventilatori i cjevovod. [11]

5.1.2. Kupolna peć s predgrijanim zrakom

Kod kupolnih peći s predgrijanim zrakom postoje dva načina oprema peći zrakom. Prvi način dobivanja predgrijanog zraka je izgaranjem ugljikova monoksida, tako što se izlazni plinovi puštaju u komoru u kojoj se zagrijava hladni zrak, dok drugi način dobivanja predgrijanog zraka je korištenjem dopunskog goriva za predgrijavanje

zraka, gdje se izlazni plinovi peći ne iskorištavaju. Investicijska ulaganja u predgrijavanje zraka dopunskim gorivom su manja nego li pregrijavanje zraka izgaranjem izlaznih plinova. [11]

5.1.3. Kupolna peć hlađena vodom

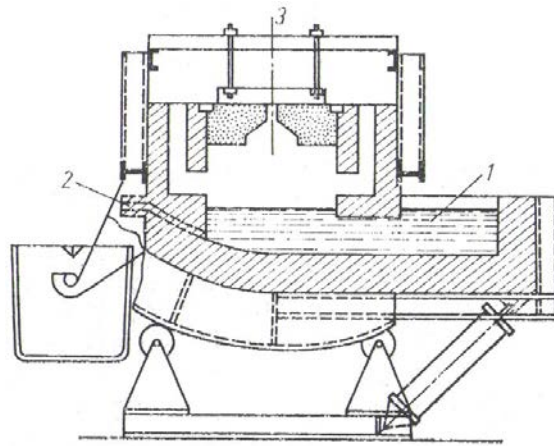
Kupolna peć hlađena vodom u određenim uvjetima je najisplativija peć, jer postoje izvedbe gdje nije potrebno obzidavanje čeličnog plašta. Zbog intenzivnog vanjskog hlađenja peći, s unutarnje strane peći na oblozi se stvara tzv. kora od troske koja omogućava da se nesmetano odvija samo taljenje metala. Kod ovakvog tipa peći toplinski gubici su svedeni na minimum. [11]

5.1.4. Obzidavanje kupolne peći

Obično se kupolna peć obzidava šamotnom opekam ili se oblaže šamotnom masom za nabijanje. Debljina samoga obzida znatno ovisi o promjeru peći. Za obzidavanje kupolnih peći također se mogu koristiti i specijalni materijali, npr. ugljične opeke i mase za nabijanje. Ispod otvora za ubacivanje zasipa peć je obzidana opekam od sivog lijeva. [11]

5.2. Plamene peći

Plamena bubnjasta i kanalna peć pripada uz kupolnu peć u skupinu najekonomičnijih talioničkih peći u ljevarstvu. Zbog znatno povećane cijene električne energije njihova važnost i u budućnosti neće biti ugrožena. U osnovi se razlikuju prema obliku prostora za taljenje [11]. Karakterizira iz manji izgled jamskog tipa u kojima se zasip u peći direktno ugrijava plamenicima pogonjeni na jednu od vrsta goriva. Goriva mogu biti ugljena prašina, loživo ulje ili zemni plin smješteni u stranicama peći. Krov peći reflektiranjem plamena prema zasipu pomaže taljenju metala. Na dnu peći se također nalazi otvor koji služi za ispuštanje rastaljenog metala. Uglavnom se koriste za neželjezne metale kao legure bakra i aluminijska [6]. Slika 10 prikazuje plamenu peć.



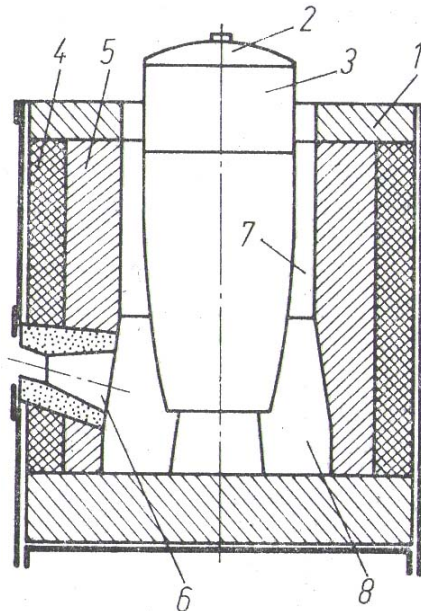
Slika 10. Plamena peć za taljenje aluminija [11]: 1 otvor za punjenje peći, 2 otvor za isput taline, 3 plamenik

Plamena bubnjasta peć sastoji se od horizontalnog bubnja čeličnog lima, obloženim vatrostalnim opekama ili masom za nabijanje. Bubanj se preko dva prstena oslanja na pogonske valjke pomoću kojih se okreće. Dok kanalna plamena peć se sastoji od korita u kojem je materijal koji se tali i ložišta. Kanalna plamena peć može biti stabilna ili nagibna ovisno o potrebi. Troškovi eksploatacije kanalne peći su relativno niski, a i njena izgradnja je relativno jednostavna i jeftina. [11]

5.3. Peći s loncem

Plamena tiganjska peć ili peć s loncem, kako starije, stabilne ložene drvenim ugljenom ili koksom, tako i suvremene, stabilne i nagibne ložene tekućim gorivom ili plinom, primjenjuju se uglavnom za taljenje lakih i teških obojenih metala. Učinak taljenja metala je malen, zato se ova vrsta peći ne koristi u slučaju potreba za veću količinu taljevine [11]. Peći s loncem nazivaju se još i indirektne peći na gorivo, jer metal u loncu nije u neposrednom dodiru s gorivom. U ljevaonicama se koriste tri tipa ovih peći, s podiznim loncem, sa statičnim loncem i s nagibnim loncem. [6]

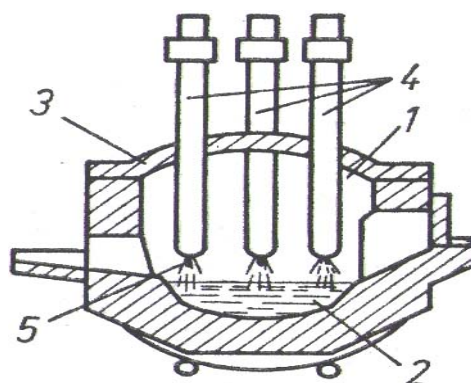
U plamenim pećima toplina metalu koji se nalazi unutar lonca predaje se zagrijavanjem stijenki lonca, čime se gubi velika količina energije. Osnovna razlika između stabilne i nagibne peći s loncem što se kod nagibne plamene peći ne vadi lonac iz peći, nego se rastaljeni metal izlije naginjanjem peći u jednu od strana [11]. Slika 11 prikazuje peć s loncem.



Slika 11. Peć s loncem [11]: 1 poklopac peći, 2 poklopac lonca, 3 nastavak, 4 izolacija, 5 obloga, 6 plamenik, 7 ogrjevna komora, 8 komora za izgaranje

5.4. Elektropeći

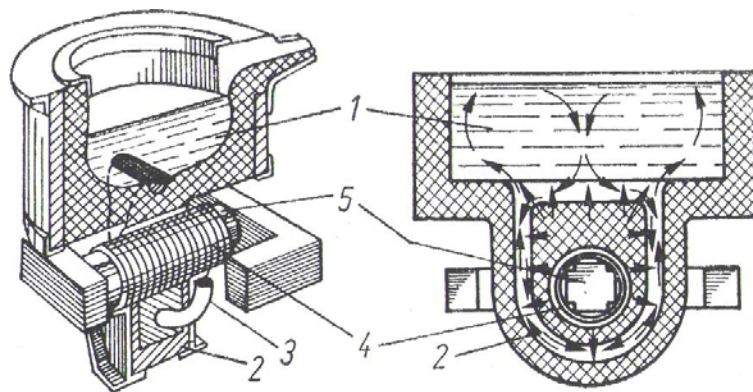
Elektropeći mogu biti elektrolučne i elektrootporne. Elektropeći u usporedbi s plamenim pećima imaju određene prednosti, bolju kvalitetu taline, manji odgor, veći koeficijent toplinske iskoristivosti, manje zagađuju atmosferu i pružaju bolje radne uvjete. Kod elektropeći metal se tali stvaranjem električnog luka koji nastaje između elektroda, indirektnim lukom. Karakterizira ih izuzetno velika potrošnja električne energije, ali je zato moguće konstruirati peći za visoke kapacitete, pa postoji mogućnost kompenzacije glede isplativosti. Ova vrsta peći prvenstveno se koristi za taljenje čelika [11]. Slika 12 prikazuje elektrolučnu peć.



Slika 12. Elektrolučna peć [11]: 1 procesni prostor, 2 talina, 3 svod, 4 elektrode, 5 električni luk

5.5. Indukcijske peći

Indukcija peč je niskofrekventna peč koja se napaja strujom iz mreže frekvencije 50 Hz pomoću transformatora za regulaciju. Prolaskom izmjenične struje kroz zavojnice peći, primarnog svitka induktora, inducira se magnetsko polje, koje inducira struju u sekundaru. Zbog djelovanja struje velike jakosti, metal se brzo ugrijava i tali. Elektromagnetska sila istovremeno uzrokuje i miješanje rastaljenoga metala. Kako metal nije u dodiru s grijačim tijelom, moguće je dobro kontrolirati okolnu atmosferu, što rezultira talinom visoke kvalitete i čistoće. Peć se može puniti krutim uloškom, te se nikada ne prazni do kraja, nego se ostavlja određeni dio taline u koju se opet dodaje kruti uložak [11]. Na slici 13 prikazana je indukcijska peč za taljenje metala.



Slika 13. Indukcijska peč [11]: 1 metal, 2 obloga, 3 kanal, 4 svitak, 5 jezgra

6. ALUMINIJ

6.1. Općenito o aluminiju

Aluminij je metal koji spada u skupinu lakih metala, te je kao takav treći najrašireniji element u zemljinoj kori, nakon kisika i silicija. On se u prirodi nalazi kao sastavni dio zemljine kore, gline i mnogih stijena i ne nalazi se u elementarnom stanju već u obliku raznih kemijskih spojeva. [11]

Općenito se metal ekstrahira iz oksidne rude zagrijavanjem jeftinim redukcijskim sredstvom (ugljik u obliku koksa), a dobiveni se sirovi metal rafinira, čime se omogućuje oksidacija većine prisutnih nečistoća. Veliki afinitet aluminija prema kisiku omogućuje takav postupak redukcije redovnim kemijskim postupkom jer se svi prateći elementi lakše reduciraju od aluminija. Svako drugo redukcijsko sredstvo je termodinamički preskupo. Prvi aluminij proizveden je upotrebom skupog redukcijskog sredstva u obliku metalnog kalija, 1825. godine. U osamdesetim godinama devetnaestog stoljeća aluminij je smatran rijetkim i dragocjenim materijalom, sve dok znanstvenici 1886. godine nisu otkrili jeftin postupak za proizvodnju aluminija. Osnovni problem visokog tališta glinice je riješen dodatkom kriolita. Smjesa glinice i kriolita tali se na oko 950 °C iz koje se aluminij dobiva elektrolitičkom redukcijom na katodnom dnu ili katodi. Bayerov postupak za proizvodnju glinice iz boksita, glavne rude za dobivanje aluminija, predstavlja početak industrijske proizvodnje aluminija. Sljedeći korak u razvoju bilo je otkriće postupka za povećanje čvrstoće aluminijских legura precipitacijskim očvršćivanjem. Time su stvoreni preduvjeti za korištenje posebnih kemijskih i fizikalnih svojstava aluminija [4]. Tako dobiveni aluminij ima čistoću iznad 99 % [11]. Slika 14 prikazuje blok aluminija.



Slika 14. Blok aluminija [12]

6.2. Svojstva aluminija

Aluminij je srebrno – bijeli sjajan laki metal. Karakterizira ga niska gustoća. Relativno je mekan, dugotrajan, dobro obradiv kovanjem, lijevanjem i ekstrudiranjem. Izuzetno je dobar vodič kako topline, tako i električne energije. Karakterizira ga također i nisko talište, te veliki afinitet prema kisiku. [4]

Ljevarska svojstva čistog aluminija su slaba zbog velikog stezanja pri skrućivanju taljevine, zbog velike topljivosti plinova u njemu te zbog jake sklonosti oksidaciji. Zbog toga se čisti aluminij rijetko koristi za izradu odljevaka. [11]

Tri glavna svojstva koja određuju primjenu aluminija:

- povoljan omjer čvrstoće i gustoće, posebno kod aluminijских legura. Gustoća aluminija je oko trećine gustoće čelika. Legiranjem i precipitacijskim očvršnućem mogu se proizvesti legure čvrstoće kao i čelici
- omjer električne vodljivosti i gustoće najpovoljniji je među metalima, te polako istiskuje bakar iz upotrebe za prijenos električne energije
- relativno velika korozijska postojanost aluminija, što mu omogućava široku primjenu.

U tablici 2 navedena su svojstva aluminija.

Tablica 2. Fizikalna i mehanička svojstva aluminija [4]

Gustoća	2700	kg/m ³
Talište	660	°C
Modul elastičnosti	69 000	N/mm ²
Električna vodljivost	36...37,8	m/Ωmm ²
Granica razvlačenja	20...120	N/mm ²
Toplinska vodljivost	23,8	10 ⁻⁶ /K
Vlačna čvrstoća	40...180	N/mm ²
Istezljivost	50...4	%

6.3. Primjena aluminija

Zahvaljujući navedenim svojstvima aluminij ima široku primjenu u mnogim proizvodnim granama. Koristi se u sve većoj mjeri u proizvodnji dijelova za automobile, zrakoplove, kamione, željezničkih vozila, plovila, bicikle. Također se koriste u građevinarstvu za izradu prozora, vrata, fasada zgrada, ograda, rasvjetnih stupova i sl. Obuhvaća i širok raspon kućanskih aparata, predmeta i posuđa. U elektrotehnici aluminij služi za izradu dalekovodnih i telefonskih vodova, za zaštitne oplate raznih namjena, podloške električnih žarulja. Svakodnevnu primjenu aluminija prepoznajemo po aluminijskim limenkama za tekućinu, hranu i sl. [11]. Na slici 15 prikazana je limenka kao primjer korištenja aluminija za gotove proizvode.



Slika 15. Primjena aluminija - primjer limenke [13]

6.4. Aluminijeve legure

Nelegirani aluminij uglavnom se koristi zbog niske gustoće i ponajprije njegove korozijske postojanosti, kao i lijepog izgleda. Legiranje aluminija ima za cilj prvenstveno poboljšanje mehaničkih svojstva, ponajprije vlačne čvrstoće i tvrdoće, zatim krutosti, rezljivosti, žilavosti ili livljivosti.

Aluminijeve legure upotrebljavaju se u lijevanom i gnječenom stanju. Mnogima od njih se mogu poboljšati mehanička svojstva precipitacijskim očvrnućem. Dok se brojne legure koriste i bez bilo kakve daljne obrade.

Najvažniji legirni elementi su bakar, magnezij, silicij, cink i mangan. Kao dodatci ili primjese prisutni su u manjoj količini željezo, krom i titan. Kompleksnije legure nastaju njihovom međusobnom kombinacijom i uz dodatak drugih legirnih elemenata

koji poboljšavaju svojstva osnovne legure, kao čvrstoću, tvrdoću, toplinsko očvršnuće, usitnjavanje zrna, rezljivost i sl. Dodatci za posebne svrhe su nikal, kobalt, litij, srebro, vanadij, cirkonij, kositar, olovo, kadmij i bizmut. Svi legirni elementi su pri visokim temperaturama potpuno topljivi u rastaljenom aluminiju. [4]

Prednosti aluminijevih legura uz malu masu su relativno niska temperatura taljenja, zanemariva topivost plinova, odlična livljivost, dobra strojna obradivost, dobra korozijska postojanost, te toplinska i električna provodljivost.

Najveći nedostatak aluminijevih legura jest volumno stezanje tijekom skrućivanja, koja se kreće u rasponu između 3,5 – 8,5 %. [4]

Prema tehnološkoj preradi aluminijeve legure dijele se na:

- lijevane legure
- gnječene legure. [4]

Ljevane legure mogu se svrstati u tri osnovne skupine Al – Si, Al – Mg i Al – Cu. Aluminijeve legure mogu se lijevati jednako dobro na sva tri osnovna načina, u pijesku, u kokili i tlačno. [4]

6.4.1. Al – Si legura

Kod Al – Si legura silicij je osnovni element koji doprinosi dobroj livljivosti, pa su time ove legure najraširenije legure u grupi lijevanih legura. Te su legure približno eutektičkog sastava (11...13 % Si), što ih čini iznimno povoljnim za tlačni lijev, budući da je njihov interval skrućivanja kratak. Pri lijevanju u pijesak postiže se gruba mikrostruktura koja se može usitniti postupkom cijepljenja ili modifikacije. Karakterizira ih dobra livljivost, dobra mehanička svojstva, izuzetna otpornost na koroziju te dobra zavarljivost. Ovakav tip legure koristi se kod odljevaka složene geometrije i tankim stjenkama kod kojih se treba izbjegavati lokalna zadebljanja. [4]

6.4.2. Al – Mg legura

Najbolju kombinaciju čvrstoće i žilavosti ima legura s 10 % Mg, no nažalost ona je jedna od najteže livljivih legura zbog pojave poroznosti, stvaranja troske i loše žitkosti. Zbog toga su najčešće u uporabi legure s 3 – 5 % Mg. Glavna značajka ovih

legura je dobra korozijska postojanost zbog čega se kod ovih legura može postići visoki sjaj. Neke od njih su i otporne na udarce pa se mogu upotrebljavati u pomorstvu, uz veliku otpornost na morsku vodu. Dobro se zavaruju i često se koriste za dekorativne potrebe. [4]

6.4.3. Al – Si – Mg legura

Legure su precipitacijski očvrstljive uz dodatak od 0,2 – 0,5 % Mg. Odlikuju se dobrom livljiivošću koja se pogoršava smanjenjem silicija. Imaju uzak temperaturni interval skrućivanja, do 30 °C i malo linearno skupljanje, do 1%. Pješčani odljevci mogu se zavarivati, kokilni odljevci djelomično, dok tlačni odljevci nikako zbog većeg sadržaja plinova. Radna temperatura odljevaka od ove legure je do 200 °C. [4]

6.4.4. Al – Cu legura

Toplinski očvrstljive legure s osrednje visokom čvrstoćom, srednjom ili slabom udarnom otpornošću, dobro otporne na visoke temperature i dobre rezljivosti. Slabe su livljivosti, a korozijska otpornost im je najslabija od svih aluminijevih legura. Pri skrućivanju dolazi do pogrubljanja zrna zbog čega se dodaje magnezij ili titan. Podnose radne temperature do 300 °C. [4]

6.4.5. Al – Si – Cu legura

Legura kojoj je dodan bakar radi poboljšavanja čvrstoće i rezljivosti, uz gubitak livljivosti i otpornosti na koroziju smanjenjem udjela silicija i povećanjem udjela bakra. Čvrstoća i tvrdoća mogu se dodatno poboljšati rastvornim žarenjem i precipitacijom. Dodavanjem titana postiže se sitnozrnata struktura i zato ova legura ima dobru žilavost, otpornost na udarce i dobru sposobnost obrade odvajanjem čestica. [4]

6.5. Precipitacijsko očvrsnuće

Precipitacijsko očvrsnuće zajednička je pojava mnogim legurama u kojima dolazi do promjene topljivosti nekih konstituenata u osnovnom metalu promjenom temperature, ali se najviše koristi u odgovarajućim aluminijevim legurama. Postupak očvrsnuća nakon gašenja držanjem legure na temperaturi okoline, zove se prirodno

dozrijevanje, koje se može ubrzati i tako postići veće čvrstoće ako se gašena legura zagrijava do temperature od oko 180 °C. Prirast čvrstoće i tvrdoće direktno je povezan sa stvaranjem koherentnih precipitata unutar rešetke osnovnog kristala mješanca. Stajanjem na temperaturi okoline legura postupno poprima sve više vrijednosti za čvrstoću i tvrdoću s odgovarajućim smanjenjem duktilnosti. Maksimalne vrijednosti dostižu se za oko šest dana. Nakon tog vremena se ne zapažaju više mjerljive promjene mehaničkih svojstava legura. [4]

6.6. Skrućivanje aluminijevih legura

Skrućivanje je proces transformacije, odnosno pretvorbe metala iz tekućeg u kruto stanje. Aluminij tijekom procesa taljenja gubi svoju pravilnu kristalnu strukturu. Proces skrućivanja obuhvaća nastajanje prvih kristala i njihov rast, odnosno kristalizaciju i formiranje mikrostrukture o čemu ovise konačna svojstva metala. Raspored atoma i struktura tekućeg metala nije u potpunosti pravilna. Skrućivanje metala vrlo je važan proces za ljevarstvo sa ciljem da bi se dobio željeni koristan oblik, odnosno odljevak željene funkcionalnosti i svojstava. [16]

Uvjeti skrućivanja metala i razvoja kristalične strukture:

- odvođenje topline iz sustava
- pothlađenost taljevine
- prisustvo centra kristalizacije.

Vrste hlađenja su: kinetičko, toplinsko, konstitucijsko, pothlađenje uslijed zakrivljenosti granične površine i pothlađenje zbog primjene tlaka. [16]

6.6.1. Tipovi skrućivanja

Tipovi skrućivanja su: ćelijasto, dendritno, ćelijasto – dendritno i eutektičko. [16]

6.6.1.1. Ćelijasto i ćelijasto – dendritno skrućivanje

Kod ove vrste skrućivanja nastaju ćelijaste i ćelijasto – dendritne strukture, a front skrućivanja nije potpuno ravan. [16]

6.6.1.2. Dendritno skrućivanje

Dendrit je razgranata kristalna tvorevina, koja u lijevanim strukturama čini osnovnu za formiranje dendritske mreže. Dendriti nastaju kod legura sa velikim intervalom skrućivanja, a nastaju iz ćelija i ćelijasto – dendritnih struktura. Stvaranje dendrita i razvoj povećava se što je interval skrućivanja veći. [16]

6.6.1.3. Eutektičko skrućivanje

Legure aluminijske koje su podelutektičkog sastava skrućuju na eutektički način. Prema teoriji skrućivanja eutektika sastoji se od tri koraka. Prvi korak: u tekućoj fazi eutektičkog sastava stvaraju se klice, iz kojih se razvijaju kristali. Drugi korak: u trenutku dodira dva rastuća kristala, započinje eutektička kristalizacija na tom mjestu i treći korak: na granici kristala nastaje prvo izlučivanje jedne krute faze, a potom druge faze. [16]

6.7. Recikliranje aluminijevih legura

Recikliranje je postupak ponovnog iskorištavanja sirovine iz otpadnog materijala. Danas recikliranje postaje sve važniji način zbrinjavanja otpada i radi se o relativno novoj tehnološkoj disciplini. Najvažnija osobina aluminijske je što se može nebrojno puta reciklirati, bez da izgubi na kvaliteti. Najpoznatiji primjer recikliranja aluminijske su limenke za piće. Isplativost recikliranja je u tome što se uštedi i do 95 % energije u odnosu na dobivanje aluminijske. Za izradu jedne limenke iz sirovine utroši se toliko energije koliko bi se moglo utrošiti za recikliranje 20-ak limenki. Proces recikliranja limenki je proces koji se sastoji od pet koraka. [14]

Prvo se provodi proces rezanja i usitnjavanja limenki na sitne komadiće, zatim odstranjivanje sloja boje i svih nečistoća koje se nalaze na površini kako bi se otpad pripremio za sljedeću fazu. Sljedeća faza je taljenje usitnjenog i očišćenog otpada, lijevanje u blokove aluminijske i ponovno valjanje. Sa zadnjim korakom smo opet dobili aluminijevu traku željene debljine, istih svojstava kao i prije, spremnu za proizvodnju gotovih proizvoda koji se mogu početi koristiti 60 dana nakon skupljanja otpada. [14]

Otpadni materijal, aluminij i njegove legure koje su već bile u korištenju, otpad od primarne proizvodnje i strugotine od obrade, recikliranjem nazivaju se sekundarni aluminij. [4]

7. PRIPREMA I OBRADA TALJEVINE ALUMINIJEVIH LEGURA

Kvaliteta taljevine, a time i kvaliteta odljevka podrazumijeva ispravno taljenje i kasniju obradu taljevine. To podrazumijeva odgovarajući kemijski sastav taljevine, odgovarajuće temperature taljenja i obrade taljevine. Postupci obrade taljevine uključuju otplinjavanje, usitnjavanje zrna i modifikaciju taljevine.

7.1. Općenito o taljenju aluminijskih legura

Prilikom taljenja aluminijskih legura veliku pozornost treba posvetiti čišćenju taljevine od plinova (otplinjavanje) i od raznih popratnih uključaka koji se pojavljuju u procesu (pročišćavanje). Aluminij je vrlo sklon da u rastaljenom stanju rastvara plinove, to se u prvom redu odnosi na vodik. Zbog velikog afiniteta prema kisiku i s obzirom na karakter oksida, aluminij je sklon stvaranju uključaka. Aluminij rastvara vodik iz plinova izgaranja, koji se unose uloškom, dok znatan utjecaj onečišćenja taljevine dolazi od reagiranja aluminija s oksidima metala koji se nalaze u oblozi peći i lonaca. [11]

Rastvoreni plinovi uzrokuju mjehuravost koja ima za posljedicu porozne odljevke. Snižanjem temperature taljevine, smanjuje se i količina rastvorenih plinova. Međutim, snižavanjem temperature taljevina postaje viskozija, što otežava izlazak plinskih mjehura. [11]

Znatno je manja naplinitost taljevine ako se za taljenje koriste peći s loncima jer tada plinovi izgaranja ne dolaze u direktan dodir s taljevinom. Najkvalitetniji odljevci su oni za koje je aluminijska legura pripremljena u elektropečima. Kvaliteta legure ovisi i o vrsti opeke kojom je peć obzidana. Zbog toga se za taljenje aluminijskih legura preporučuje magnezitna opeka. [11]

Nemetalni uključci u taljevinu uglavnom dolaze kao kemijski spojevi plinova s aluminijem i drugim metalima prisutnim u taljevini. Nemetalni uključci u odljevku raspoređeni su prvenstveno po granicama zrna te tako narušavaju vezu među njima. Posljedica su manja čvrstoća i smanjena otpornost na koroziju. Glavni uzročnik nemetalnih uključaka u aluminijskim odljevcima je kisik. [11]

7.2. Priprema metalnog uloška

Metalni uložak najčešće se sastoji od primarne sirovine, legura u bloku propisanog sastava i tzv. kružnog (povratnog) materijala. Kružni materijal obuhvaća sav odmetak i priljevke nastale u ljevaonici. Ako se za sastav metalnog uloška koristi i otpadna legura tzv. lomljevina, prethodno se mora pretaliti u blokove i kemijski analizirati. [11]

Pri sastavljanju metalnog uloška najvažnije je da dijelovi zasipa nisu zamašćeni ili vlažni, zbog toga metalne sirovine treba skladištiti na suhome mjestu. Također je potrebno paziti da se u kružnom materijalu ne nađu različite kvalitete ljevova. U kemijskom sastavu metalnog uloška posebno treba paziti na propisani sadržaj nečistoća. Željezo je osnovna nečistoća koja pogoršava mehanička svojstva, osobito deformabilnost. Utjecaj željeza posebno je štetan pri lijevanju u pješčane kalupe jer je tada sporo skrućivanje, te se željezo stvara u obliku nakupina. Osim toga uzrokuje formiranje grubih kristala, što je općenito štetno. Previsok sadržaj željeza također utječe na toplinsku obradu aluminijskih legura. [11]

7.3. Peći za taljenje aluminijskih legura

Postoji više različitih vrsta peći za taljenje aluminijskih legura. U rutinskoj se upotrebi induksijske tiganjske peći i induksijske kanalne peći te plamene peći. Najekonomičnija peć za taljenje aluminijskih legura je električna peć. Uz to, električna peć daje i najbolju kvalitetu taljevine [11]. Sve peći za taljenje metala detaljno su objašnjene u poglavlju 5. Peći za taljenje metala. Slika 16 prikazuje elektrootpornu peć u Laboratoriju za ljevarstvo na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



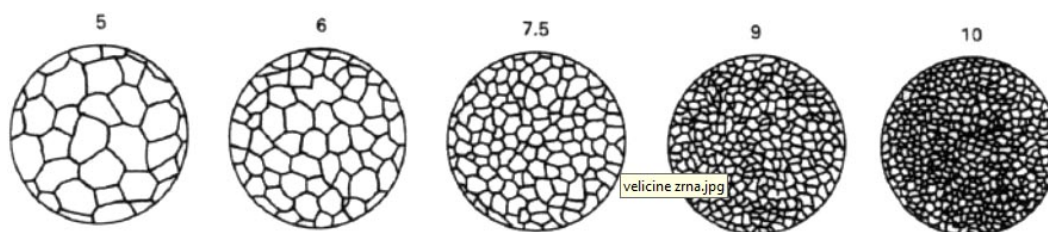
Slika 16. Elektrootporna peč za taljenje aluminija

7.4. Usitnjavanje zrna aluminijevih legura

Postupak obrade taljevine usitnjavanjem zrna (cijepljenje) uobičajen je u industrijskoj proizvodnji. Na taj se način poboljšavaju mehanička svojstva odljevka poput granice razvlačenja, žilavosti i otpornosti na vruće pukotine, bolja je završna površina i strojna obradivost, smanjuje se količina otpada te se ujednačava raspodjela sekundarnih faza i mikroporoznost. Usitnjavanjem zrna grubozrnata stubičasta struktura pretvara se u sitnozrnatu. Fino, ravnoosno zrno je najpoželjnije u većini legura jer poboljšava mogućnost napajanja odljevka uz smanjenje osjetljivosti na tople pukotine i vodikovu poroznost te poboljšava njegovu kvalitetu obzirom na više vrijednosti mehaničkih svojstava. Tijekom uobičajenih uvjeta skrućivanja komercijalnih legura, bez usitnjavanja zrna, odljevci pokazuju grubu stubičastu ili ravnoosnu strukturu. Ovakve strukture manje su otporne na pucanje tijekom skrućivanja, kao i za vrijeme naknadnog hlađenja odljevka. U industrijskoj proizvodnji najpopularnija metoda usitnjavanja zrna je upotreba sredstva za usitnjavanje zrna, čiji konstituenti djeluju kao podloge za stvaranje nukleusa prema mehanizmu heterogene nuklecije. [15]

7.4.1. Sredstva za usitnjavanje zrna

Sredstva za usitnjavanje zrna su kemijski dodaci taljevini. Najčešće se u proizvodnji koriste predlegure koje sadrže titan i bor. Predlegure dolaze u obliku žica, ploča, šipki, saća i tableta. Količina predlegura koju dodajemo u taljevinu ovisi o kemijskom sastavu taljevine, sadržaju nečistoća i uvjetima lijevanja. Dva najvažnija svojstva sredstva za usitnjavanje zrna su vrijeme kontakta i slabljenje učinka sredstava za usitnjavanje zrna. Vrijeme kontakta je vrijeme koje je potrebno da bi se postigla konačna struktura i veličina zrna. Slabljenje učinka je pojava koja se javlja zadržavanjem taljevine u peći duže vrijeme što dovodi do razvitka grubozrnate stubičaste strukture. Idealno sredstvo za usitnjavanje zrna ima kratko kontaktno vrijeme i ne slabi duljim zadržavanjem taljevine u peći [12]. Slika 17 prikazuje različite veličine zrna.



Slika 17. Shematski prikaz različitih veličina zrna [15]

Vrste sredstava za usitnjavanje zrna:

- AlTiB predlegure
- AlTi predlegure
- AlTiC predlegure.

7.4.1.1. AlTi predlegure

Predlegure na bazi titana prva su razvijana i upotrebljavana sredstva za usitnjavanje zrna. Dodaju se u taljevinu nekoliko minuta prije lijevanja. AlTi predlegure sastoje se od Al_3Ti čestica uronjenih u metalnu osnovu primarnog aluminija. Postotak titana u predlegurama kreće se između 5 – 10 % i utječe na učinkovitost i otapanje AlTi predlegura. Veći sadržaj titana u taljevini sprječava otapanje Al_3Ti čestica. [15]

7.5. Al – Si eutektička modifikacija

Eutektik u Al – Si legurama je slabo povezan i nepravilan te raste u obliku eutektičkih kolonija. Mikrostrukturni elementi eutektičkih legura općenito se dijele na lamele, vlakna i kugle. Pri nastanku eutektičke kolonije moguć je različit mehanizam nastajanja u ovisnosti o brzini hlađenja i prisutnosti tuđih primjesnih atoma. Pri tvorbi kolonija faza silicija je vodeća i predstavlja ishodište za nukleaciju druge faze i cijele kolonije. U većini slučajeva se na vodećoj fazi kristalizira i druga faza. [17]

7.5.1. Mehanizmi modifikacije

Lijevana struktura određuje mehanička svojstva odljevka koja su povezana s veličinom, oblikom i raspodjelom eutektičkog silicija u mikrostrukтури. Za dani kemijski sastav postoji mogućnost optimizacije veličine zrna, eutektičke strukture i veličine raspodjele intermetalnih čestica. Modifikacijom se mijenja mehanizam rasta eutektičkog silicija, dok aluminijska faza nije zahvaćena. Željena struktura može se dobiti na dva načina: dodavanjem kemijskih modifikatora ili brzim hlađenjem. [17]

7.5.1.1. Kemijski modifikatori

Kemijski modifikatori su sredstva koja se ciljano dodaju u taljevinu radi promjene oblika silicijeve faze u zaobljeni oblik. Ova promjena djeluje na disperziju poroznosti od stezanja pri skrućivanju i znatno poboljšava mehanička svojstva i strojnu obradivost legure. Kod podeutektičkih legura upotrebljavaju se elementi: natrij, kalcij, stroncij i antimon, a kod nadeutektičkih legura upotrebljava se fosfor. [17]

7.5.1.2. Modifikacija brzim hlađenjem

Uvjeti skrućivanja legura ne odgovaraju ravnotežnima, odnosno skrućivanje se odvija velikom brzinom hlađenja, što dovodi do izlučivanja neravnotežnih mikrostrukturnih sastojaka. To znači da odstupanjem od termodinamičke ravnoteže uvjetuje pomicanje eutektičke temperature nižim vrijednostima te pomicanje eutektičkog sastava višim vrijednostima udjela silicija. Mikrostruktura usmjereno skrutnutog Al – Si eutektika postaje finija s porastom brzine skrućivanja, odnosno brzinom hlađenja. [17]

7.6. Poroznost

Poroznost ima negativan utjecaj na kvalitetu površine odljevka, smanjenje udarnog djelovanja, smanjenje vlačne čvrstoće, smanjenje gustoće odljevka i otpornost prema koroziji, a nastaje zbog smanjenja volumena taljevine prilikom procesa skrućivanja u kalupu. Prilikom taljenja, taljevina aluminijske legure sklona je upijanju vodika i oksida te u manjoj mjeri i nekih elemenata u tragovima. Otopljeni plinovi oslobađaju se za vrijeme prijelaza iz tekućeg u kruto stanje i na mjestima gdje je taljevina najduže ostala u tekućem stanju nastaje porozitet. Odgovarajućom kontrolom prilikom lijevanja i specijaliziranim procesnim tehnikama moguće je kontrolirati poroznost prilikom taljenja. Smanjenje poroznosti provodi se pomoću procesa otplinjavanja. [18]

7.6.1. Topivost plinova

Prilikom procesa taljenja aluminijskih legura dolazi do burne reakcije između aluminija i vodene pare iz atmosfere peći. Usporedno s navedenom reakcijom moguća je istovremena reakcija između karbida i nitrida aluminija s vodenom parom, pri čemu se stvara određena količina plinova metana, ugljikova monoksida i amonijaka. Zbog reakcije aluminija s vodenom parom u taljevinu mogu prijeći nekoliko puta veće količine plina, koliko će plina prijeći ovisi o parcijalnom tlaku vodene pare i brzini reakcije. Vodik je jedini plin koji se može značajnije otopiti u taljevini aluminija i glavni je faktor koji utječe na plinsku poroznost. [18]

7.6.2. Predtaljenje

Proces predtaljenja najčešće se provodi u električnim pećima. Aluminijska legura šaržira se u blokovima ili tekućem stanju i drži se između 120 do 180 minuta u mirnom stanju na temperaturi između 670 – 710 °C. Za to vrijeme na površini taljevine aluminijske legure stvara se pjena sačinjena od nemetalnih primjesa i plinova koja se može skidati. Peći za predtaljenje većinom su nagibne iz razloga da se taljevina može izlijevati bez razaranja oksidnog filma stvorenog na površini. [18]

7.6.3. Pročišćavanje plinovima

Najjednostavniji način otplinjavanja taljevine aluminijske legure je pomoću injektiranja plina za pročišćavanje ili plinske smjese pod tlakom kroz grafitne cijevi ili čelične cijevi presvučene keramikom. Plin za pročišćavanje služi za uklanjanje vodika iz taljevine. Vodik difundira u mjehure plina za pročišćavanje koji se dižu na površinu taljevine te odlaze u atmosferu. Plin za pročišćavanje može biti inertni plin kao argon i dušik ili reaktivni plin kao klor i freon. Nedostatci klora i argona: klor kao plin je otrovan, iz tog razloga kloriranje treba provoditi u dobro pokrivenome loncu i prozračnoj ljevaonici, dok je argon kao plin skup. [18]

7.6.4. Otplinjavanje ultrazvučnim vibracijama

Postupak otplinjavanja vibracijama koristi ultrazvučne vibracije visokog intenziteta s ciljem stvaranja oscilirajućih tlakova u taljevini aluminijske legure. Oscilirajući tlak stvara kavitacije i trga mjehuriće plina na manje i raspršenje kako bi bolje apsorbirao vodik. Otplinjavanje ultrazvučnim postupkom može se postići unutar nekoliko minuta i znatno je brže nego tradicionalne metode otplinjavanja. [18]

7.6.5. Otplinjavanje heksakloretanom

Upravo ova metoda otplinjavanja aluminijskih legura je najčešća metoda otplinjavanja u ljevačkoj praksi. Umetnute tablete u taljevini aluminijske legure raspadaju se stvarajući plinoviti AlCl_3 . Plinski mjehuri AlCl_3 koji se dižu s dna taljevine skupljaju plinoviti vodik i odnose ga na površinu taljevine. Tablete mogu sadržavati soli za rafinaciju koje pomažu vlaženju oksidnih uljučaka unutar taljevine. Da bi tablete bile potpuno djelotvorne, moraju se održavati potpuno suhima i trebaju se potapati pomoću čistog, suhog alata. Potapanje tableta treba biti do pune dubine taljevine i tablete se moraju zadržavati u toj poziciji sve dok plinski mjehuri izlaze na površinu, odnosno dok se tableta ne otopi potpuno. [18]

8. EKSPERIMENTALNI DIO

U ovom radu ispitivana su svojstva AlSi12 legure. Eksperimentalni dio rada proveden je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, u Laboratoriju za ljevarstvo, Laboratoriju za metalografska ispitivanja te u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava.

Cilj rada bio je ispitati utjecaj određene obrade taljevine na mikrostrukturu i mehanička svojstva AlSi12 legure i to:

- utjecaj cijepljena AlTi10 predlegurom
- utjecaj modifikacije natrijem u obliku soli
- utjecaj modifikacije čistim natrijem
- utjecaj otplinjavanja Nitralom C19 na neobrađenu AlSi12 leguri te AlSi12 leguru cijepljenu AlTi10 predlegurom.

Iz gotovih odljevaka izradili su se uzorci i epruvete korišteni za ispitivanja.

Ispitivanja koja su provedena na uzorcima i epruvetama:

- kemijska analiza
- metalografska ispitivanja
- radiografska ispitivanja
- mehanička ispitivanja.

8.1. Izrada odljevaka

Za potrebe ispitivanja izrađeno je šest odljevaka identičnih dimenzija iz iste AlSi12 legure. Prvi odljevak lijevan je neobrađenom AlSi12 legurom, dok se proces izrade ostalih odljevaka razlikuje u dodavanju AlTi10 predlegure, natrija i Nitrala 19 u taljevinu. Na slici 18 prikazani su blokovi AlSi12 legure.

U tablici 3 prikazani su odljevci korišteni za ispitivanja.

Tablica 3. Prikaz odljevaka korištenih za ispitivanja

Redni broj odljevka	Stanje
1.	Odljevak neobrađene AlSi12 legure
2.	Odljevak neobrađene AlSi12 legure cijepljene AlTi10 predlegurom
3.	Odljevak neobrađene AlSi12 legure otplinjene Nitralom C19
4.	Odljevak AlSi12 legure cijepljene AlTi10 predlegurom i otplinjene Nitralom C19
5.	Odljevak AlSi12 legure s dodatkom modifikatora na bazi natrijevih soli
6.	Odljevak AlSi12 legure s dodatkom modifikatora natrija u čistom obliku



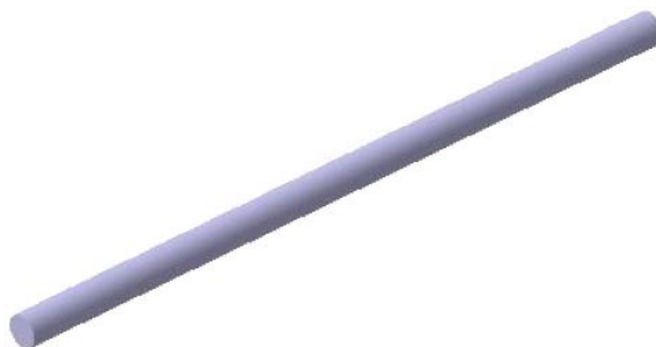
Slika 18. Blokovi aluminijske legure AlSi12

8.1.1. Model odljevaka

Za izradu odljevaka korišten je isti model, koji je prikazan na slici 19.

Dimenzije modela:

- šipka $\phi 20 \times 450$ mm
- pojilo $\phi 45 \times 100 \times \phi 60$ mm
- spust $\phi 45 \times 100 \times \phi 60$ mm



Slika 19. Model odljevka

8.1.2. Izrada kalupa

Lijevanje odljevaka obavljalo se u jednokratnim pješčanim kalupima. Za potrebe lijevanja odljevaka na potpuno isti način izrađeno je svih šest kalupa. Prvi korak u izradi kalupa bila je izrada donje polovice kalupa postavljanjem modela u okvir donje polovice kalupa. Uslijedilo je nasipavanje kalupne mješavine na model, sabijanje kalupne mješavine te okretanje donje polovice kalupa za 180°. Slika 20 prikazuje sabijanje kalupne mješavine.



Slika 20. Sabijanje kalupne mješavine

Nakon što je izrađen donjak, prelazi se na izradu gornje polovice kalupa. Izrada započinje postavljanjem okvira gornje polovice kalupa na donju polovicu te postavljanjem modela spusta i pojila. Slijedi nasipavanje i sabijanje kalupne mješavine i zadnji korak, uklanjanje modela spusta, pojila i oblikovanje spusta. Slijedi uklanjanje elemenata uljevnog sustava i spajanje gornjaka i donjaka. Slike 21, 22 i 23

prikazuju postavljanje modela spusta i pojila, nasipavanje kalupne mješavine i oblikovanje spusta. Slika 24 prikazuje gotovi kalup.



Slika 21. Postavljanje modela spusta i pojila



Slika 22. Umetanje kalupne mješavine



Slika 23. Oblikovanje spusta



Slika 24. Jednokratni pješčani kalup

8.1.3. Lijevanje odljevaka

Taljenje AlSi12 legure izvodi se u elektrootpornoj peći za taljenje volumena ljevačkog lonca približno 1,2 l. Slika 25 prikazuje elektrootpornu peć korištenu za taljenje aluminijske legure.



Slika 25. Elektrootporna peć

8.1.3.1. Lijevanje prvog odljevka

Komadi AlSi12 legure stavljeni su u ljevački lonac elektrootporne peći (slika 26), griju se i tale na temperaturi nešto višoj od 660 °C (slika 27). Iz peći je izvađen ljevački lonac sa taljevinom i nakon što je izmjerena temperatura od 660 °C (slika 28) pristupilo se lijevanju taljevine u kalup (slika 29). Dobiven je odljevak neobrađene AlSi12 legure.



Slika 26. Komadi AlSi12 legure u ljevačkom loncu



Slika 27. Taljenje AlSi12 legure



Slika 28. Mjerenje temperature taljevine



Slika 29. Ulijevanje taljevine u pješčani kalup

Slika 30 prikazuje odljevak neobrađene AlSi12 legure.



Slika 30. Odljevak neobrađene AlSi12 legure

8.1.3.2. Lijevanje drugog odljevka

U preostalu taljevinu AlSi12 legure ostavljene u ljevačkom loncu potrebno je dodati AlTi10 predleguru za usitnjavanje zrna taljevine kako bi se mogao izraditi drugi odljevak potreban za ispitivanje. Teorijski se za aluminijevu leguru AlSi12 dodaje 0,5 g/kg AlTi10 predlegure za usitnjavanje zrna. Nakon dodavanja AlTi10 predlegure taljevinu je potrebno ponovno grijati do temperature nešto više od 660 °C. Izvađenom ljevačkom loncu s taljevinom mjeri se temperatura i kada postigne 660 °C ulijeva se taljevina u kalup. Dobiven je odljevak AlSi12 legure s dodatkom AlTi10 predlegure. Na slici 31 je prikazana AlTi10 predlegura.



Slika 31. Predlegura AlTi10 za usitnjavanje zrna

8.1.3.3. Lijevanje trećeg odljevka

U neobrađenu AlSi12 leguru za vrijeme taljenja dodano je 8 g nitrata C19 s ciljem otplinjavanja taljevine. Nitral C19 u obliku tablete prikazan je na slici 32. Tablete treba skladištiti na suhome. Prilikom dodavanja tablete taljevini, potopljena je sa suhim i čistim alatom za potapanje, izvedenim u obliku zvona. Držana je potopljena 2 minute, dok se nisu prestali stvarati mjehuri. Odstranjena je nastala pjena na površini taljevine i pri temperaturi od 660 °C započet je proces lijevanja taljevine u kalup. Dobiven je odljevak neobrađene AlSi12 legure otplinjen nitalom C19. Slika 33 prikazuje proces potapanja tablete u taljevini.



Slika 32. Tableta Nitrata C19



Slika 33. Potapanje tablete u taljevini

8.1.3.4. Lijevanje četvrtog odljevka

AlSi12 leguri s dodatkom AlTi10 predlegure dodano je 12 g Nitrala C19. Tableta Nitrala prikazana je na slici 32. Postupak dobivanja taljevine potpuno je identična kao i za treći odljevak. Nakon otapanja tablete u taljevini, postignuta je temperatura od 660 °C i započinje ulijevanje taljevine u kalup. Dobiven odljevak je AlSi12 legura s dodatkom AlTi10 predlegure otplinjena pomoću Nitrala C19.

8.1.3.5. Lijevanje petog odljevka

U rastaljenu leguru u peći dodano je sredstvo za kemijsku modifikaciju Modikalit na bazi natrijevih soli proizvođača Termit (slika 34). Modikalit je sredstvo koje štiti taljevinu od oksidacije i adsorpcije plinova. Rad s ovim dodatkom nije opasan i osigurava dobra tehnološka i mehanička svojstva modificirane legure. Na taljevinu je dodano 10 g sredstva za modifikaciju. Nakon 5 minuta taljevina i sredstvo su promiješani, a nakon 10 minuta odstranjena je troska. Postizanjem temperature od 660 °C započelo je ulijevanje taljevine u kalup. Dobiven je odljevak AlSi12 legure modificiran s natrijem na bazi soli. Na slici 35 vidljivo je miješanje sredstva Modikalita i taljevine.



Slika 34. Pakiranje Modikalita



Slika 35. Miješanje Modikalita s taljevinom

8.1.3.6. Lijevanje šestog odljevka

U lonac s taljevinom dodano je 1,5 g natrija. Dodan je Navac, čisti oblik metalnog natrija, koji ne sadrži nečistoće koje stvaraju plinove. Dodatak je vakuumski zapakiran u aluminijskoj konzervi, prikazan na slici 36. Dodavanje natrija potrebno je obaviti pažljivo zbog izuzetno burne reakcije s taljevinom (slika 37). Nakon 5 do 7 minuta konstantnog polaganog miješanja taljevine, odstranjena je nastala troska. Kad je izmjerena temperatura taljevine od 660 °C pristupilo se lijevanju u kalup. Dobiven je odljevak AlSi12 legure s dodatkom metalnog natrija.



Slika 36. Pakiranje natrija



Slika 37. Dodavanje natrija u taljevinu

Svi dobiveni odljevci istih su dimenzija i oblika. Nakon lijevanja slijedi vađenje odljevaka iz kalupa.

8.1.4. Vađenje odljevaka

Nakon lijevanja taljevine, hlađenja i skrućivanja odljevka, razdvajanjem kalupnih ploča razbijamo kalup određenim alatom. Vršimo čišćenje i vizualnu kontrolu odljevka. Na slici 38 prikazano je razbijanje kalupa.



Slika 38. Razbijanje kalupa

8.2. Metalografska ispitivanja

Uzorci i epruvete izrađeni su na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u Laboratoriju za alatne strojeve i Laboratoriju za metalografska ispitivanja, gdje su izvedena i ispitivanja svjetlosnim mikroskopom.

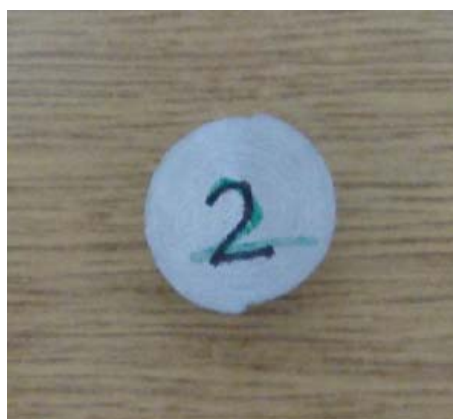
8.2.1. Priprema uzoraka

Uklanjanje spusta i pojila izvedeno je strojnom obradom u Laboratoriju za alatne strojeve. Iz svakog dobivenog odljevka izdvojen je po jedan uzorak za metalografska ispitivanja. Prije ispitivanja izdvojeni uzorci su pripremljeni standardnim postupcima. Slika 39 prikazuje izdvajanje uzoraka za metalografska ispitivanja i komada za izradu epruveta za mehanička ispitivanja, dok slika 40 prikazuje izdvojeni uzorak.

Dimenzije uzoraka: $\phi 20 \times 10$ mm



Slika 39. Izdvajanje uzoraka i komada odljevka



Slika 40. Izdvojeni uzorak za metalografsko ispitivanje

8.2.1.1. Brušenje uzoraka

Brušenje uzoraka izvršeno je na stroju Phoenix Alpha – grinder/polisher. Brušenje je izvedeno voodootpornim brusnim papirom sa brusnim zrnima od silicijevih karbida u četiri koraka s izmjenama papira P320, P600, P1200 i P2400. Nakon svake izmjene papira uzorci su zakretani za 90° s ciljem uklanjanja tragova prethodnog brušenja. Brušenje se izvodi pri 300 min^{-1} , a kao sredstvo za hlađenje korištena je voda. Slika 41 prikazuje stroj za brušenje ispitnih uzoraka.



Slika 41. Stroj za brušenje ispitnih uzoraka

8.2.1.2. Poliranje

Poliranje ispitnih uzoraka izvršeno je uređajem Struers DAP – V. Prije samoga poliranja, ispitni uzorci su očišćeni u ultrazvučnoj čistilici. Za poliranje je korištena tkanina MD – Mol i dijamantne paste (slika 44). Poliranje je izvršeno pri 150 min^{-1} , a korišteno sredstvo za hlađenje je tekućina DP – Lubricant Red. Na slici 42 prikazana je ultrazvučna čistilica, a na slici 43 uređaj za poliranje.



Slika 42. Ultrazvučna čistilica



Slika 43. Uređaj za poliranje



Slika 44. Dijamantne paste

8.2.1.3. Nagrizanje

Nagrizanje ispitnih uzoraka izvodi se u trajanju od 15 sekundi po jednom uzorku.

Korištene kiseline za nagrizanje:

- 1 ml HF
- 3 ml HCL
- 5 ml HNO₃
- 191 ml H₂O.

8.2.2. Ispitivanje mikroskopom

Metalografska ispitivanja ispitnih uzoraka izvršena su na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX S1 sa mogućnošću uvećanja od 50x do 1000x. Na slici 44 prikazan je korišteni svjetlosni mikroskop.



Slika 45. Svjetlosni mikroskop

8.3. Mehanička ispitivanja na kidalici

Mehanička ispitivanja provedena su na hidrauličkoj kidalici WEB WPM nazivne sile 400 kN. Kidalica je povezana s osobnim računalom opremljenim softverskim paketom TIRA za prikaz rezultata ispitivanja mehaničkih svojstava na kidalici izvršena su u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Za utvrđivanje vlačne čvrstoće i istezanja proveden je statički vlačni pokus na 17 dobivenih epruveta iz odljevaka. Na slici 46 prikazana je ispitna kidalica. Slika 47 prikazuje čeljusti za stezanje epruvete na kidalici.



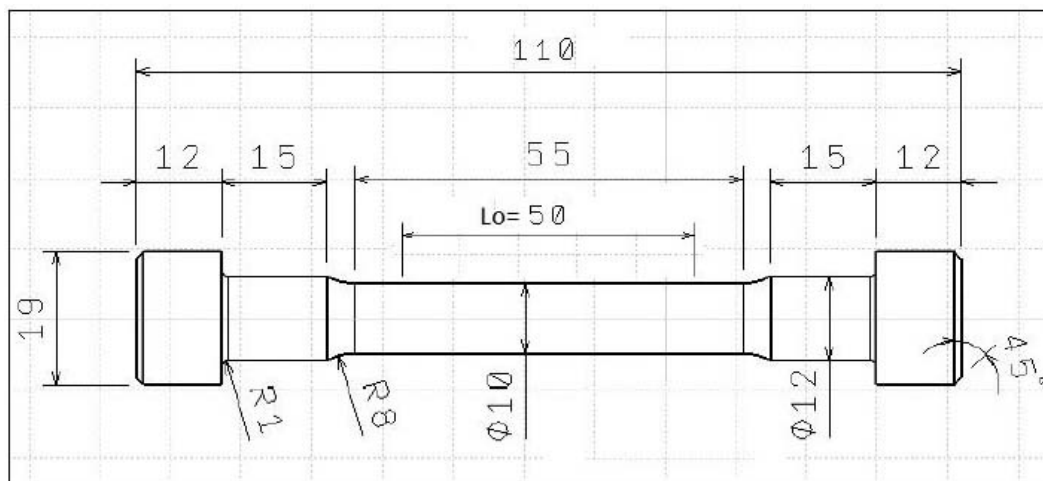
Slika 46. Hidraulička kidalica



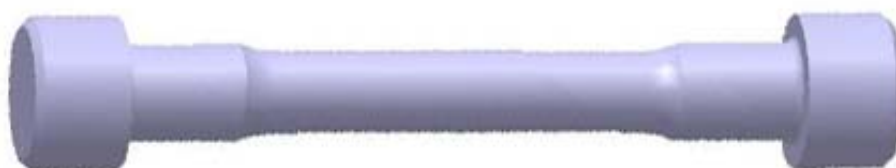
Slika 47. Epruveta u čeljustima kidalice

8.3.1. Izrada epruveta

Epruvete za mehaničko ispitivanje na kidalici izrađene su strojnom obradom na potrebne dimenzije, vidljive na slici 48. Iz prvog odljevka izrađene su dvije epruvete, dok od svih ostalih odljevaka izrađene su po tri epruvete. Izgled epruvete prikazan je na slici 49.



Slika 48. Dimenzije epruvete



Slika 49. Ispitna epruveta za mehanička ispitivanja

9. REZULTATI I RASPRAVA

9.1. Rezultati kemijske analize

Kemijska analiza provedena je na uzorku neobrađene AlSi12 legure.

Utvrđen je sljedeći kemijski sastav neobrađene AlSi12 legure:

- 88,43 % Al
- 11,38 % Si
- 0,164 % Fe
- 0,02 % Cu.

Rezultati dobiveni kemijskom analizom prikazani su u tablici 3.

Tablica 4. Rezultati kemijske analize AlSi12 legure

LECO Corporation - GDS						
AlSi12 -04.07.2012						
Name: AlSi12			Type: SMP			
Calc Mode: Concentration			Date: 07/04/12 11:30:46			
Analytes	AVG	STD	RSD	Burn 1	Burn 2	Burn 3
Al (%)	88.43	0.007	0.008	88.43	88.42	88.43
Si (%)	11.38	0.007	0.062	11.38	11.38	11.37
Fe (%)	0.164	0.004	2.925	0.159	0.167	0.167
Cu (%)	0.02	0.001	2.739	0.02	0.02	0.02
Mn (%)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg (%)	0.00	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00
Ni (%)	0.00	0.002	54.275	0.01	0.00	0.00
Zn (%)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Pb (%)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Sn (%)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ti (%)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr (%)	0.00	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00
Vacuum	3.046	0.003	0.130	3.051	3.044	3.044
Voltage	1198	0.065	0.005	1198	1198	1198
Current	44.876	0.000	0.000	44.876	44.876	44.876

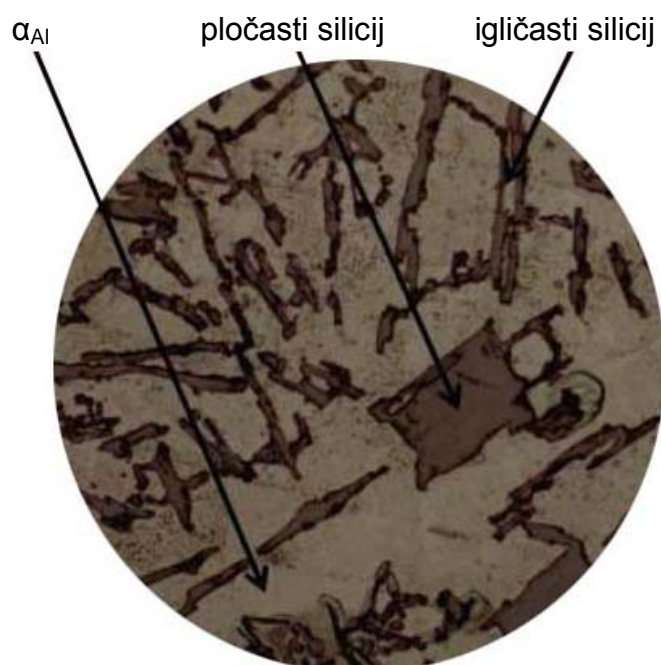
9.2. Rezultati metalografskih ispitivanja

Prilikom ispitivanja uzoraka svjetlosnim mikroskopom dobivene su sljedeće snimke mikrostrukture:

- neobrađena AlSi12 legura (slika 50 i 51).

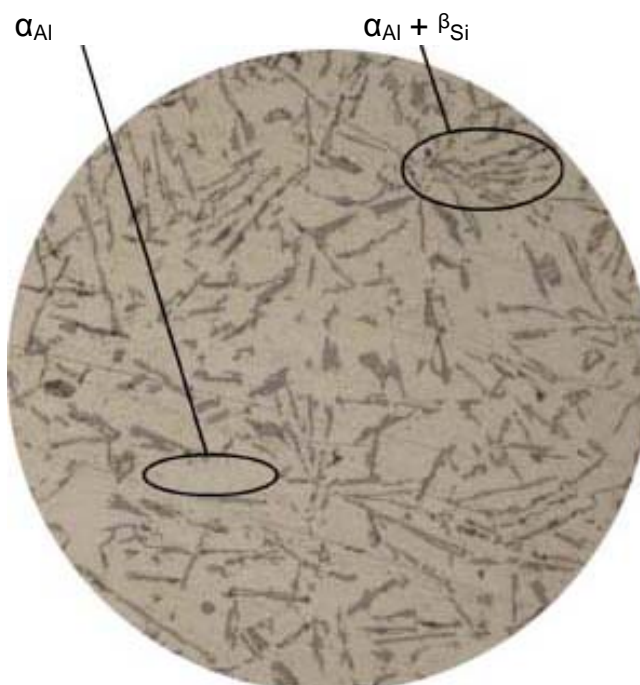


Slika 50. Mikrostruktura neobrađene AlSi12 legure (povećanje 200x)



Slika 51. Mikrostruktura neobrađene AlSi12 legure (povećanje 500x)

- AlSi12 legura cijepljena AlTi10 predlegurom (slike 52 i 53).



Slika 52. AlSi12 legura cijepljena AlTi10 predlegurom (povećanje 200x)

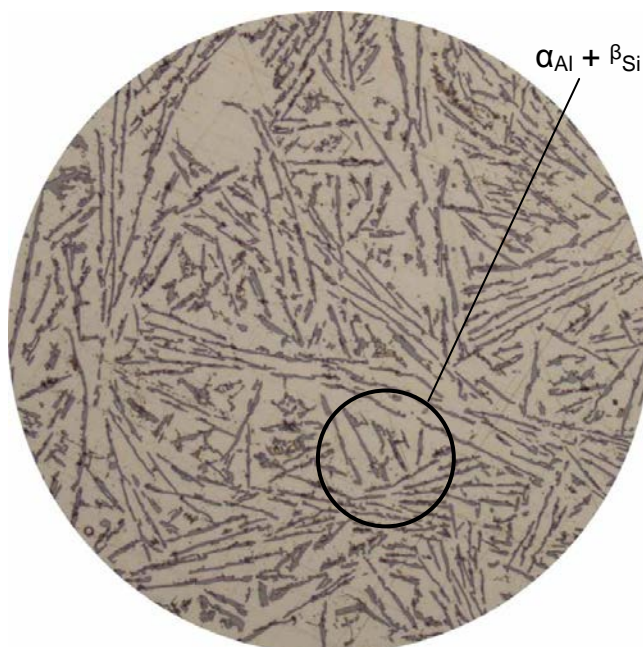


Slika 53. AlSi12 legura cijepljena AlTi10 predlegurom (povećanje 500x)

Na dobivenim snimkama mikrostrukture AlSi12 legure cijepljene AlTi10 predlegurom uočen je eutektički silicij β_{Si} koji je znatno tanji, usitnjeniji i pravilnije raspoređen nego kod neobrađene AlSi12 legure. Pločasti (primarni) silicij velikim dijelom je prešao u igličasti oblik. Dakle, u leguri dodatkom AlTi10 titan je djelovao.

- neobrađena AlSi12 legura otplinjena Nitralom C19.

Slike 54 i 55 prikazuju neobrađenu AlSi12 leguru otplinjenu Nitralom C19 s povećanjem od 200x i 500x.

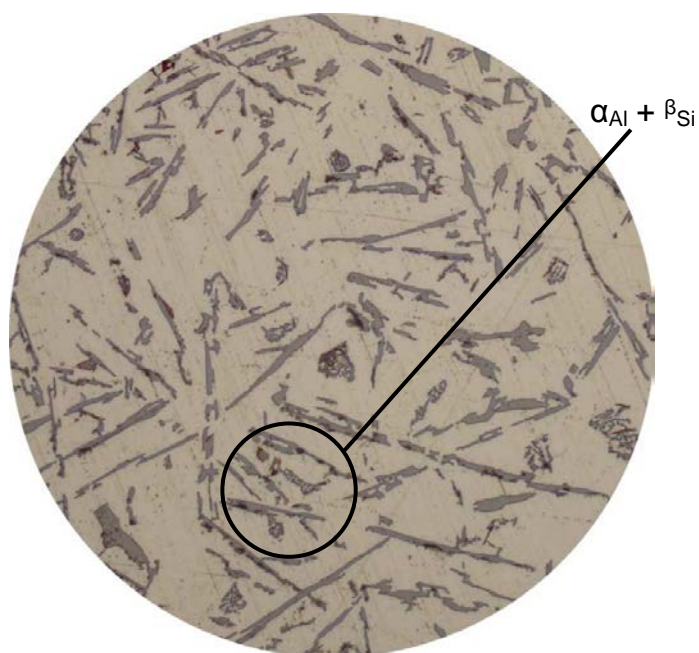


Slika 54. Mikrostruktura neobrađene AlSi12 legure otplinjene Nitralom C19
(povećanje 200x)



Slika 55. Mikrostruktura neobrađene AlSi12 legure otplinjene Nitralom C19
(povećanje 500x)

- AlSi12 legura cijepljena AlTi10 predlegurom i otplinjena Nitralom C19 (slike 56 i 57).



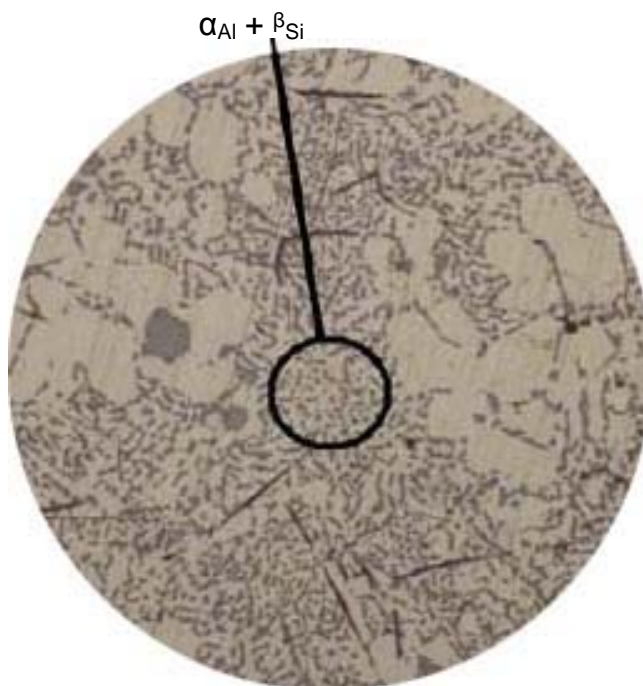
Slika 56. Mikrostruktura AlSi12 legure cijepljene AlTi10 predlegurom i otplinjena Nitralom C19 (povećanje 200X)



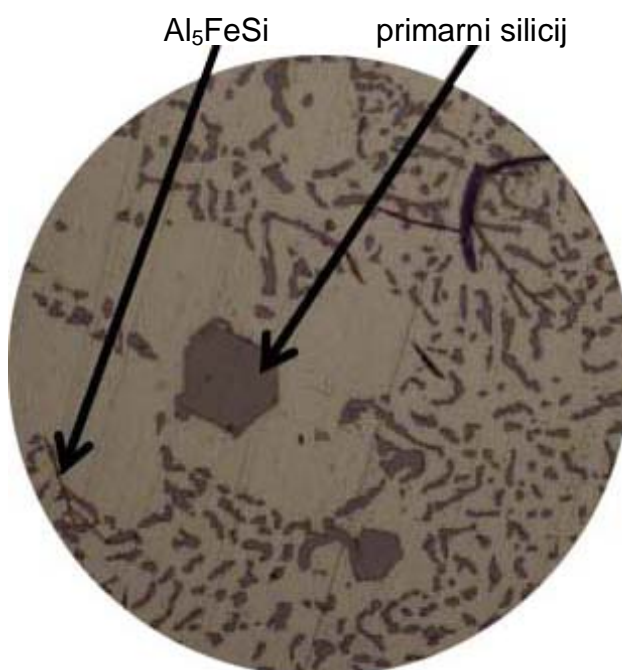
Slika 57. Mikrostruktura AlSi12 legure cijepljene AlTi10 predlegurom i otplinjena Nitralom C19 (povećanje 500X)

Na snimkama mikrostrukture AlSi12 legure otplinjene nitalom C19 uočena je prisutnost nemodificiranog eutektika s lamelnim silicijem i intermetalne faze $\text{Al}_8\text{Mg}_3\text{FeSi}_6$.

- AlSi12 legura s dodatkom modifikatora na bazi natrijevih soli (slika 58 i 59).

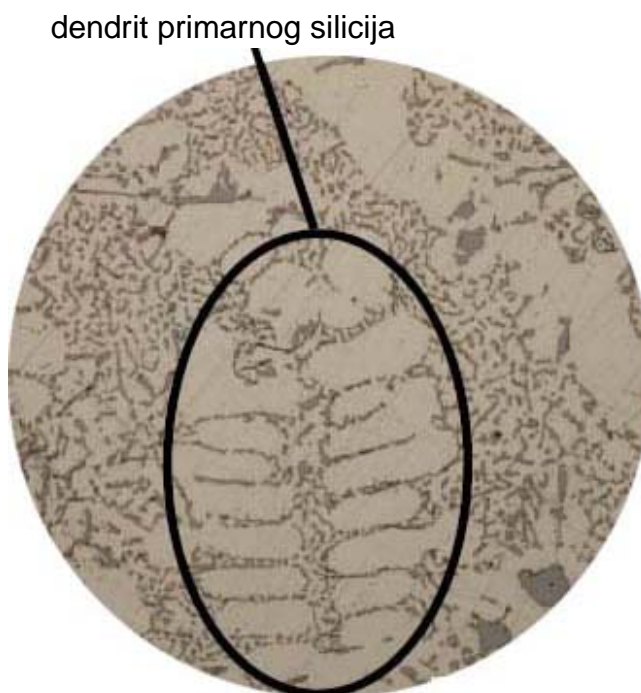


Slika 58. Mikrostruktura AlSi12 legure s modificirane Modikalitom (povećanje 200x)

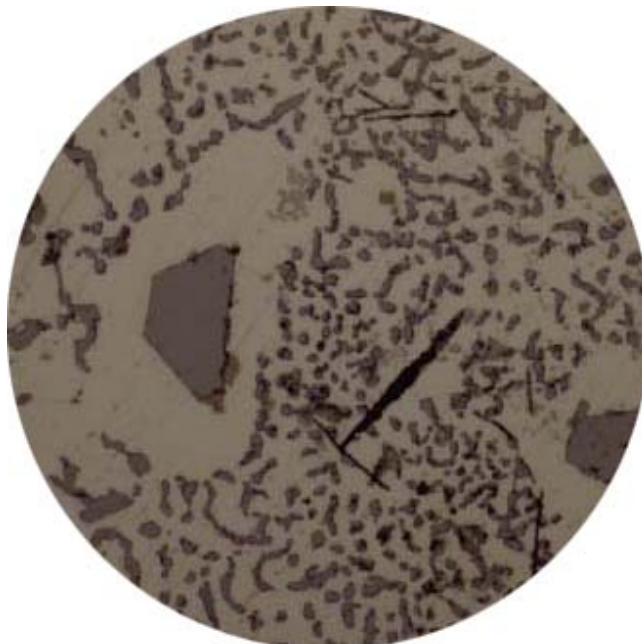


Slika 59. Mikrostruktura AlSi12 legure s modificirane Modikalitom (povećanje 500x)

- AlSi12 legura modificirana čistim natrijem (slika 60 i 61).



Slika 60. Mikrostruktura AlSi12 legure modificirane čistim natrijem (povećanje 200x)



Slika 61. Mikrostruktura AlSi12 legure modificirane čistim natrijem (povećanje 500x)

Na snimkama mikrostrukture AlSi12 legure modificirane Modikalitom uočeno je da su primarni aluminij i eutektički silicij znatno sitniji i ravnomjernije raspoređen nego kod

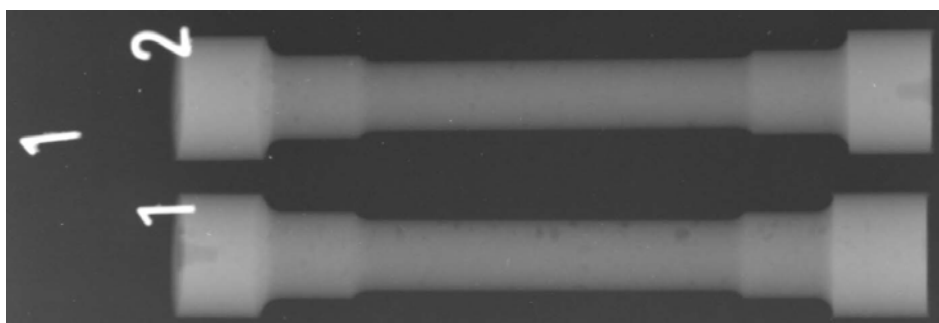
nemodificirane legure. Uočena je i prisutnost visokotemperaturne faze na osnovi željeza. Može se vidjeti modificirani eutektik s vlaknastim silicijem i primarni poliedarski silicij. Igličasti eutektički silicij je velikim dijelom prešao u finiji, vlaknasti oblik, a preostali je usitnjen.

U mikrostrukтури AlSi12 legure modificirane natrijem uočavamo dendrit primarnog silicija. Eutektik je također znatno sitniji nego kod nemodificirane strukture. Eutektički silicij je iz igličastog oblika, prisutnog u nemodificiranoj leguri, proveden u finiji vlaknasti oblik, ali su vlakna na nekim mjestima manja, a na nekim mjestima veća. Iz uočenih promjena očituje se djelotvornost modifikacije dodatkom natrijevih soli ili natrija u taljevinu.

9.3. Rezultati radiografskog ispitivanja

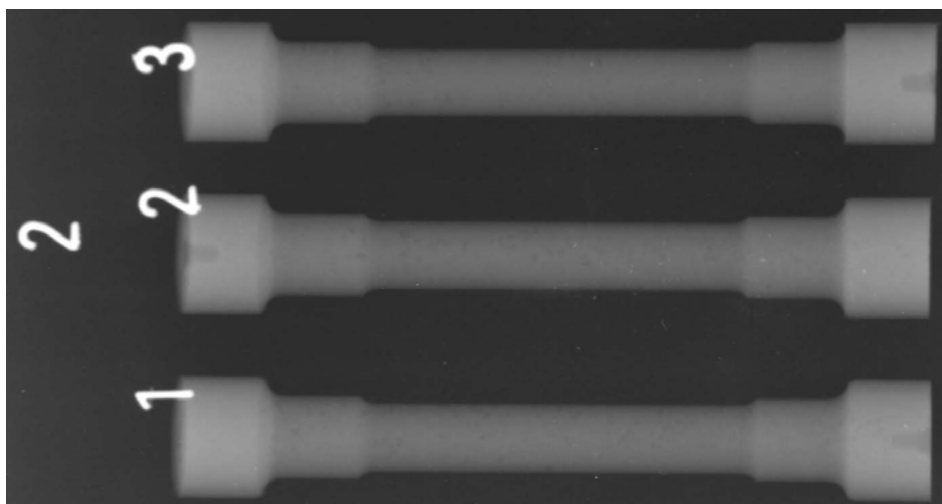
Radiografskom kontrolom ispitnih epruveta za mehanička svojstva dobiveni su sljedeći radiogrami:

- epruvete neobrađene AlSi12 legure (slika 62).



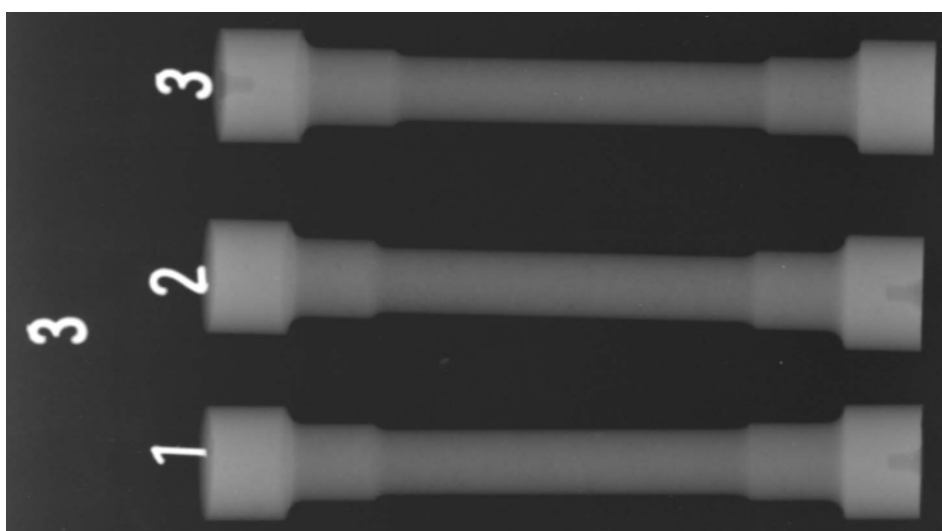
Slika 62. Radiogram epruveta neobrađene AlSi12 legure

- epruvete od AlSi12 legure cijepljene AlTi10 predlegurom (slika 63).



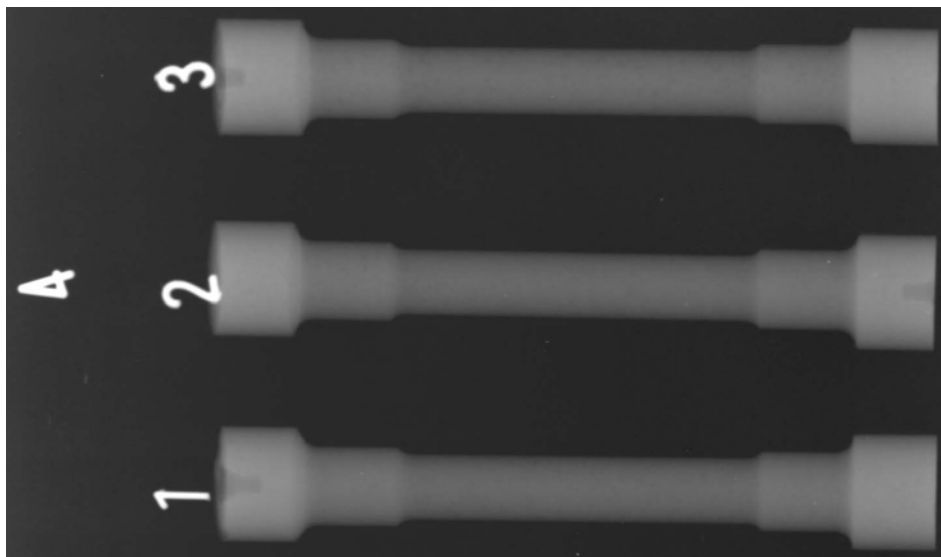
Slika 63. Radiogram epruveta AlSi12 legure cijepljene AlTi10 predlegurom

- epruvete od neobrađene AlSi12 legure otplinjene Nitralom C19 (slika 64).



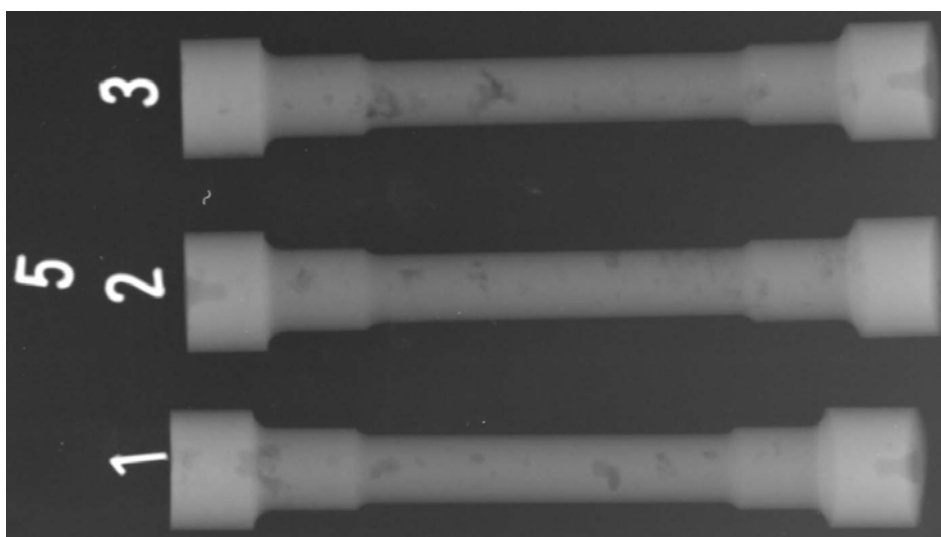
Slika 64. Radiogram epruveta neobrađene AlSi12 legure otplinjene Nitralom C19

- epruvete od AlSi12 legure cijepljene AlTi10 predlegurom i otplinjene Nitralom C19 (slika 65).



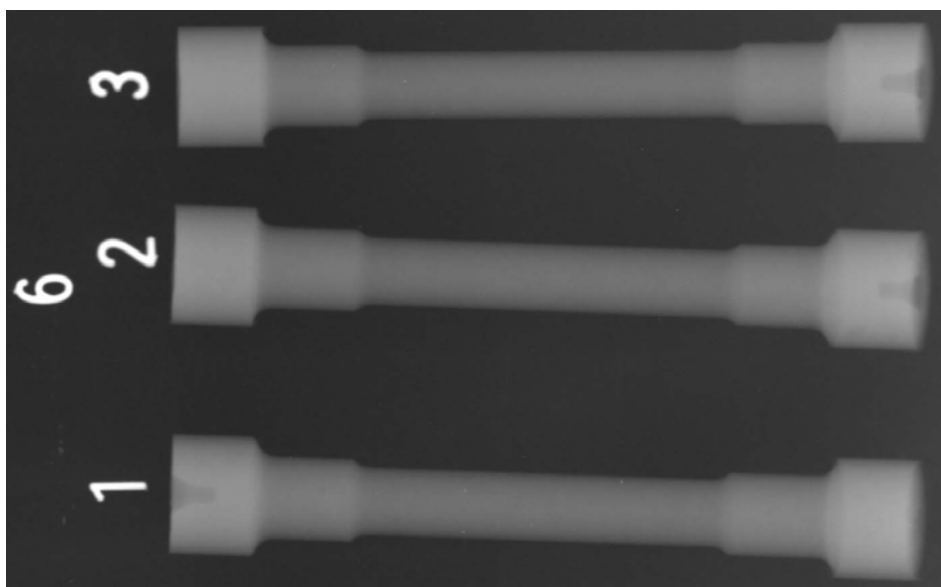
Slika 65. Radiogram epruveta AlSi12 legure cijepljene AlTi10 predlegurom i otplinjene Nitralom C19

- epruvete od AlSi12 legure modificirane Modikalitom (slika 66).



Slika 66. Radiogram epruveta AlSi12 legure modificirane Modikalitom

- epruvete od AlSi12 legure modificirane čistim natrijem (slika 67).



Slika 67. Radiogram epruveta AlSi12 legure modificirane čistim natrijem

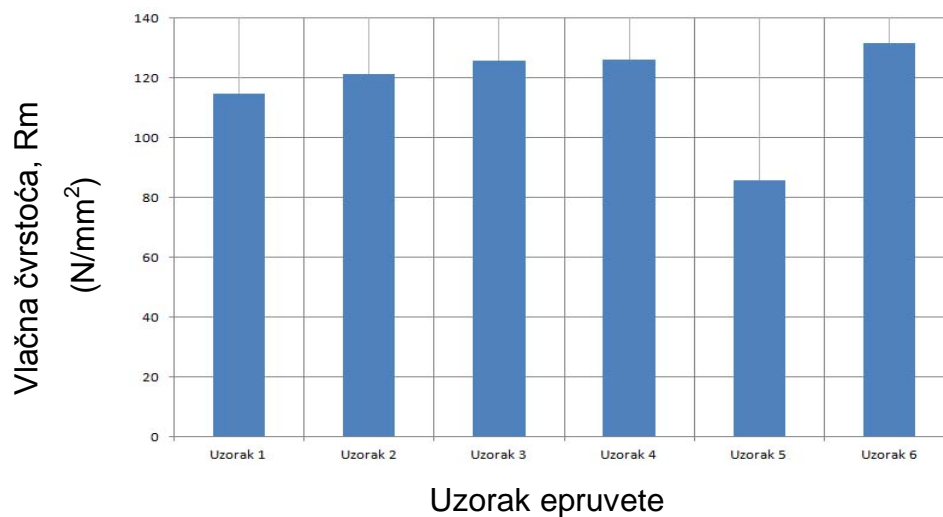
Usporedbom dobivenih radiograma uočeno je da je poroznost AlSi12 legura modificirana Modikalitom znatno viša od poroznosti ostalih uzoraka. Najmanja poroznost prisutna je u AlSi12 leguri cijepljene AlTi10 predlegurom i otplinjene nitralom C19. Iz dobivenih radiograma može se zaključiti da najbolju otpornost prema poroznosti ima AlSi12 legura cijepljena AlTi10 predlegurom s provedenim otplinjavanjem taljevine Nitralom C19.

9.4. Rezultati mehaničkih ispitivanja

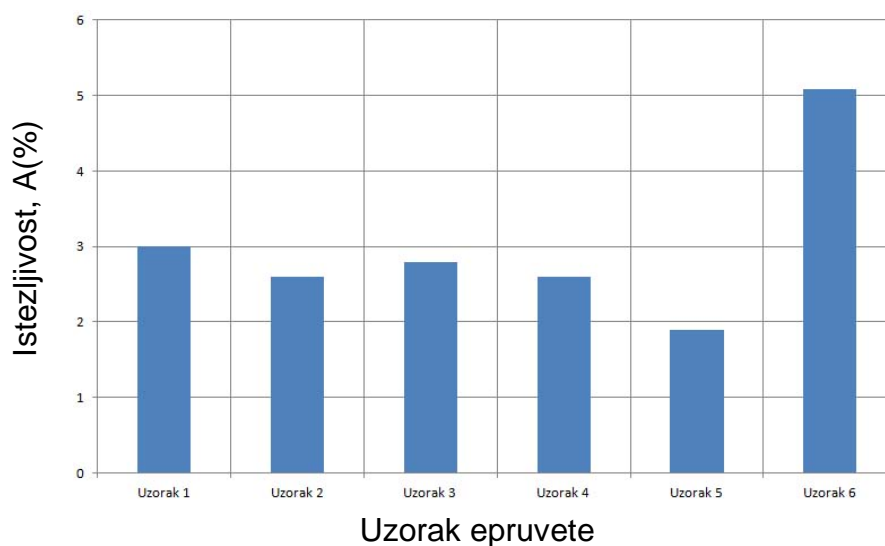
Provedbom statičkog vlačnog pokusa na ispitnim epruvetama dobiveni su sljedeći rezultati prikazani tablicom 4.

Stanje	Epruveta	Vlačna čvrstoća, R_m (N/mm ²)	Istezljivost, A (%)	Srednje vrijednosti	
				$R_{m-srednje}$ (N/mm ²)	$A_{srednje}$ (%)
Neobrađena AlSi12 legura	1.1	115,5	3,4	114,9	3
	1.2	114,3	2,6		
AlSi12 legura cijepljena AlTi10 predlegurom	2.1	119,8		121,3	2,6
	2.2	125,1	2,5		
	2.3	118,9	2,6		
Neobrađena AlSi12 legura otplinjena Nitalom C19	3.1	124,6	3,2	125,9	2,8
	3.2	125,1	2,6		
	3.3	128,2	2,6		
Neobrađena AlSi12 legura otplinjena Nitalom C19	4.1	123,5	2,3	126	2,6
	4.2	129,8	2,6		
	4.3	124,7	2,8		
AlSi12 legura modificirana Modikalitom	5.1	100,8	2,0	85,7	1,9
	5.2	81,8	2,2		
	5.3	75,1	1,6		
AlSi12 legura modificirana čistim natrijem	6.1	130,9	4,8	131,8	5,09
	6.2	127,1	4,8		
	6.3	135,9	5,6		

Slike 68 i 69 prikazuju grafički prikaz srednjih vrijednosti vlačnih čvrstoća i srednjih vrijednosti istezljivosti ispitanih uzoraka epruveta.

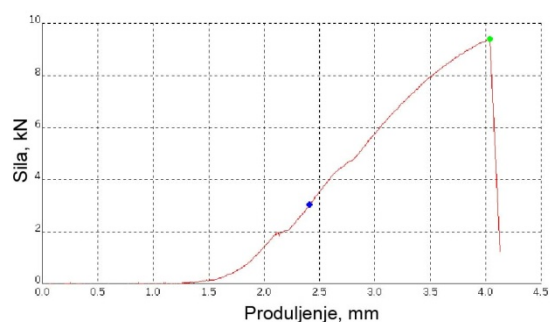
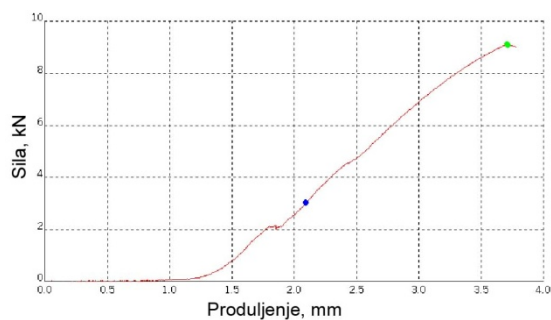


Slika 68. Srednje vrijednosti vlačnih čvrstoća uzoraka epruveta

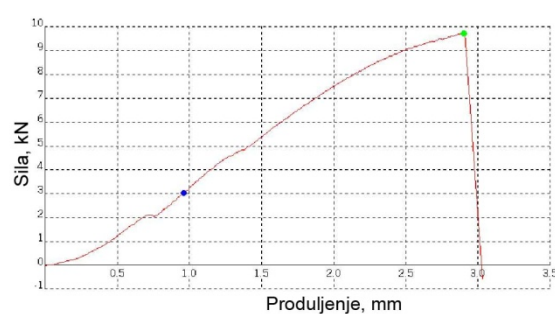
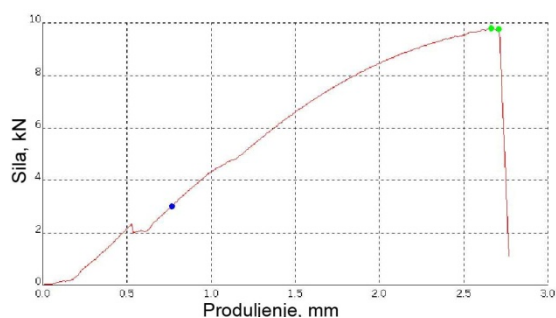


Slika 69. Srednje vrijednosti istezljivosti uzoraka epruveta

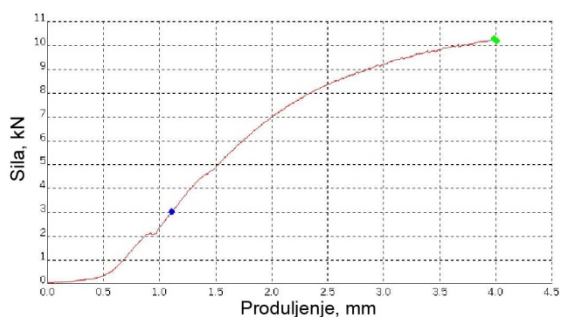
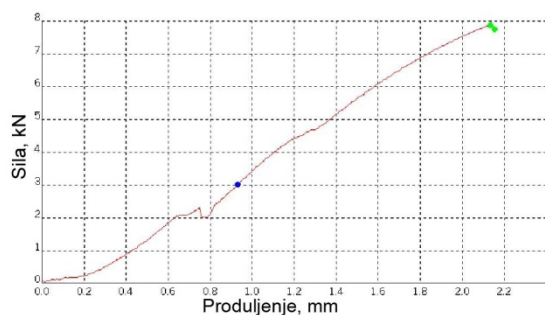
Na slikama 70, 71 i 72 dan je računalni zapis rezultata mehaničkih ispitivanja epruveta na kidalici.



Slika 70. Računalni zapis rezultata ispitivanja na kidalici za uzorak 1 i 2



Slika 71. Računalni zapis rezultata ispitivanja na kidalici za uzorak 3 i 4



Slika 72. Računalni zapis rezultata ispitivanja na kidalici za uzorak 5 i 6

Analizom rezultata mehaničkih ispitivanja na kidalici uočeno je da AlSi12 legura modificirana čistim natrijem ima znatno veću srednju vlačnu čvrstoću ($R_{m-srednje} = 131,8 \text{ N/mm}^2$) i srednju istezljivost ($A = 5,09\%$), dok su najlošiji rezultati mehaničkih ispitivanja dobiveni kod AlSi12 legure modificirane Modikalitom s rezultatima srednje vlačne čvrstoće ($R_{m-srednje} = 85,7 \text{ N/mm}^2$) i istezljivost ($A = 1,9\%$) znatno lošijima od ostalih uzoraka ispitivanja.

10. ZAKLJUČAK

Cijepljenje AlTi10 predlegurom, otplinjavanje Nitralom C19 i modifikacija natrijem u čistom obliku i obliku soli primjenjuje se da bi se poboljšala mehanička svojstva (vlačna čvrstoća, duktilnost, tvrdoća i žilavost) i strojna obradivost AlSi12 legura.

U sklopu rada provedeno je cijepljenje AlSi12 legure AlTi10 predlegurom za usitnjavanje zrna, otplinjavanje Nitralom C19 neobrađene AlSi12 legure i cijepljene s AlTi10 predlegurom te modifikacija Modikalitom i čistim natrijem.

Provedbom metalografskih, radiografskih i mehaničkih ispitivanja obrade AlSi12 legure zaključeno je sljedeće:

- metalografska ispitivanja pokazala su da dolazi do promjene igličastog silicija u vlaknasti oblik, eutektik je sitniji, ravnomjernije raspoređen i povoljno utječe na mikrostrukturu
- radiografska analiza pokazala je da se otplinjavanjem Nitralom C19 AlSi12 legure cijepljene AlTi10 predlegurom postiže najmanja poroznost uzorka, dok se modifikacijom natrijem u obliku soli poroznost znatno povećava što znači da pri modifikaciji natrijevim solima treba provesti otplinjavanje taljevine
- mehanička ispitivanja pokazala su da se modifikacijom AlSi12 legure čistim natrijem postiže veća vlačna čvrstoća i istezljivost, a modifikacijom AlSi12 legure natrijevim solima vlačna čvrstoća i istezljivost se smanjuju.

LITERATURA

- [1] Unkić, F., Glavaš, Z.: Osnove lijevanja metala, Zbirka riješenih zadataka, Sisak, 2009.
- [2] Budić, I.: Posebni ljevački postupci I. dio, Strojarski fakultet u Slavonskom brodu, 2006.
- [3] Budić, I.: Posebni ljevački postupci II. dio, Strojarski fakultet u Slavonskom brodu, 2009.
- [4] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2006.
- [5] dostupno na:
<http://oldstmartinsbells.co.uk/news/casting-first-bells/> (06.09.2012.)
- [6] dostupno na:
http://www.fsb.unizg.hr/atlantiss/upload/newsboard/20_10_2011__15683_ljevarstvo-2011.pdf (06.09.2012.)
- [7] dostupno na:
<http://www.enproinc.com/industries/diecasting> (06.09.2012.)
- [8] dostupno na:
<http://www.fordracingparts.com/images/part/full/M6010D46.jpg> (07.09.2012.)
- [9] Smith, W.: Principles of materials science and engineering, Florida, 1990.
- [10] dostupno na:
<http://www.ljevarstvo.hr/slike/Pregled%20poslovanja%20hrvatskih%20ljevarnica%20u%202008.pdf> (08.09.2012.)
- [11] Savez ljevača Hrvatske: Ljevački priručnik, Zagreb, 1985.
- [12] Bižić, V.: Livljivost, Diplomski rad, Metalurški fakultet u Sisku, Sisak, 2009.
- [13] dostupno na:
<http://blatobran.wordpress.com/2012/02/28/konkurs-za-dizajniranje-etikete-za-specijalno-izdanje-limenke/> (09.09.2012.)
- [14] dostupno na:
http://www.uresudruga.com/index.php?option=com_content&view=article&id=17&Itemid=19 (09.09.2012.)
- [15] Kalauz, V.: Istraživanje svojstava sekundarnih Al – legura, Magistarski rad, Metalurški fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2011.

- [16] Stanić, D.: Utjecaj uvjeta skrućivanja i obrada taline na mikrostrukturna i mehanička svojstva legure AlSi9MgMn, Metalurški fakultet, Sisak, 2012.
- [17] Zovko Brodarac, Z.: Pregled utjecaja brzog hlađenja na modifikaciju eutektičkog silicija u Al – Si slitinama, Ljevarstvo 45, 2003.
- [18] Aluminijske legure; Tehnička enciklopedija, svezak A – Beta, Zagreb, 1971.